

Schutzniveau von Maßnahmenkonzepten: Evaluierung anhand von empirischen Daten und durch probabilistische Modellierung

M. Tischer, U. Poppek

**Forschung
Projekt F 1914**

**Forschung
Projekt F 1914**

M. Tischer
U. Poppek

**Schutzniveau von Maßnahmenkonzepten:
Evaluierung anhand von empirischen Daten
und durch probabilistische Modellierung**

Dortmund/Berlin/Dresden 2007

Diese Veröffentlichung ist der Abschlussbericht zum Projekt „Einsatz von Modellen im Rahmen der Bewertung neuer und alter Stoffe (zukünftig REACH) sowie bei der Zulassung von Biozid-Produkten - Teil 1: Vergleichende Bewertung von Modellunsicherheiten bei der Abschätzung inhalativer Expositionen“ - Projekt F 1914 - der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

Autoren: Dr. Martin Tischer
Dipl.-Ing. Ulrich Poppek
Gruppe „Belastungen am Arbeitsplatz“

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
Friedrich-Henkel-Weg 1-25, 44149 Dortmund
Telefon: 0231 9071-0
Telefax: 0231 9071-2454
E-Mail: poststelle@buaa.bund.de
Internet: www.buaa.de

Berlin:
Nöldnerstr. 40-42, 10317 Berlin
Telefon: 030 51548-0
Telefax: 030 51548-4170

Dresden:
Proschhübelstr. 8, 01099 Dresden
Telefon: 0351 5639-50
Telefax: 0351 5639-5210

Alle Rechte einschließlich der fotomechanischen Wiedergabe und des auszugsweisen Nachdrucks vorbehalten.
Aus Gründen des Umweltschutzes wurde diese Schrift auf Recyclingpapier gedruckt.

ISBN 978-3-88261-072-7

Inhaltsverzeichnis

Kurzreferat	5	
Abstract	6	
1	Einleitung und Überblick	7
1.1	Hinweise für den Leser	9
2	Stand der Untersuchungen	10
2.1	Wirkungsseite	10
2.2	Expositionsseite	11
3	Methodenkritik	13
4	Abgrenzung des Begriffs „Schutzniveau“	15
5	Fragestellung und methodischer Ansatz	17
5.1	Evaluierung des Schutznieaus anhand von Messdaten	17
5.2	Bildung eines probabilistischen Modells für Einzelstoffe	20
5.2.1	Monte-Carlo-Simulation	22
5.2.2	Modellbildung für Gemische	25
6	Datenbasis	27
6.1	Expositionsdaten	27
6.2	Grenzwertdaten	28
6.3	Repräsentativität	29
7	Evaluierung des Schutznieaus anhand der BWI-Häufigkeitsverteilungen	31
7.1	Auswahl der Daten	31
7.2	Ergebnisse	32
7.2.1	Control-Banding Szenario: Gefährlichkeitsgruppe A, EPL3, CS1	32
7.2.2	Control-Banding Szenario: Gefährlichkeitsgruppe B (+A), EPL2, CS1	33
8	Evaluierung des Schutznieaus durch Monte-Carlo-Simulation	35

8.1	Ergebnisse der branchenspezifischen Simulation	37
8.2	Simulationsergebnisse auf der Grundlage gepoolter Branchendaten	39
8.3	Ergebnisse der generischen Simulation	42
9	Zusammenfassung	48
10	Literatur	53
11	Verzeichnis der Tabellen	57
12	Verzeichnis der Abbildungen	58
Anhang		59
Anhang A	Mathematischer Hintergrund	60
Anhang B	Der Control-Banding Ansatz des EMKG für inhalative Gefährdungen	70

Schutzniveau von Maßnahmenkonzepten: Evaluierung anhand von empirischen Daten und durch probabilistische Modellierung

Kurzreferat

In dieser Arbeit wird mit Hilfe eines integrierten Evaluierungsverfahrens untersucht, ob die Control-Banding Vorgaben des Einfachen Maßnahmenkonzeptes Gefahrstoffe (EMKG) in der Praxis ein ausreichendes Schutzniveau bewirken. Ausgangspunkt hierfür ist die Bildung des Bewertungsindex (BWI), der den Quotienten aus Exposition und Grenzwert darstellt. Die Variabilität des BWI an Arbeitsplätzen wird durch entsprechende Häufigkeitsverteilungen abgebildet. Die hiermit korrespondierenden statistischen Kennwerte (Perzentile etc.) erlauben Rückschlüsse auf das erreichte Schutzniveau.

Als Datengrundlage für die Berechnung der BWI-Häufigkeitsverteilungen stehen im Wesentlichen die Ergebnisse (n = 732) von Branchenprojekten der BAuA aus den letzten 15 Jahren zur Verfügung. Welche Daten in die Evaluierung einfließen können, wird anhand der Kriterien Gefährlichkeitsgruppe, Freisetzungspotenzial und Maßnahmenlevel entschieden, die in ihrer Gesamtheit das „Control-Banding Szenario“ festlegen. Lediglich für zwei Control-Banding Szenarien konnten Messwerte gefunden werden: Für das Control-Banding Szenario ‚Gefährlichkeitsgruppe A, EPL3, CS1‘ liegen ausschließlich Messwerte (n = 220) zu Propan-2-ol aus Offsetdruckbetrieben vor. Nur etwa 0,4 % der BWI sind hier größer 1, so dass ein ausreichendes Schutzniveau vorzuliegen scheint.

Für das Szenario ‚Gefährlichkeitsgruppe B, EPL2, CS1‘ stehen Expositionsdaten zum Einsatz von Lösemitteln in Siebdruckbetrieben (n = 50), Optikerwerkstätten (n = 49) und im Bereich der Möbelherstellung (n = 13) zur Verfügung. Lediglich im Bereich der Möbelherstellung liegt ein BWI über 1. Insgesamt deutet dies auf ein ausreichendes Schutzniveau hin.

Mit Hilfe des Monte-Carlo-Verfahrens wird untersucht, ob sich die Häufigkeitsverteilungen der BWI mit Hilfe eines probabilistischen Ansatzes modellieren und somit ggf. verallgemeinern lassen. Als Modellinput dienen die gefitteten Häufigkeitsverteilungen der Arbeitsplatzgrenzwerte und Messwerte. Die Simulationsrechnungen zeigen, dass bei homogener und gering korrelierter Datenbasis (Messdaten aus einer Branche) die BWI-Verteilung durch die modellierte (RCR)-Verteilung gut reproduziert wird. Dagegen treten bei heterogener Datenbasis (gepoolte Daten aus verschiedenen Branchen) Abweichungen auf. Gleichwohl können bei heterogener Datenbasis die Simulationsergebnisse als generische Aussagen zum erreichbaren Schutzniveau interpretiert werden.

Stichwörter:

Control-Banding, Schutzniveau, Evaluierung, Messdaten, Monte-Carlo-Simulation

Safety level of workplace control schemes: Evaluation on the basis of empirical data and by probabilistic modelling

Abstract

Using an integrated approach this study aims to investigate if the control-banding conditions adopted by the 'Easy-to-use workplace control scheme for hazardous substances' can lead to a sufficient safety level. Starting point for the evaluation is the assessment index (BWI) which is the quotient of the exposure level and the threshold value. To reflect the variability of workplace conditions the frequency distributions of the BWI are calculated. The corresponding statistical values (Percentiles etc.) allow conclusions on the realized safety level.

The data basis for calculating the BWI frequency distribution are the measurement results ($n = 732$) of BAuA field studies performed in the last 15 years. The selection of data taken into account in the evaluation has been decided by the criteria "hazard band", "exposure potential" und "control approach" which determine in its entirety the "control-banding scenario". Measurement data are only available for two "control-banding scenarios": Regarding the scenario 'hazard band A, EPL3, CS1' there are only data ($n = 220$) for propane-2-ol used in the offset printing area. About 0.4 % of the BWI are above 1. This indicates a sufficient safety level.

For the control banding scenario 'Hazard band B, EPL2, CS1' there are exposure data available from screen printing firms ($n = 50$), optician workshops ($n = 49$) and from the area of furniture production ($n = 13$). There is only one BWI above 1 in the area of furniture production. On the whole there seems to be a sufficient safety level.

The Monte-Carlo-Simulation has been used to investigate if the BWI frequency distributions can be modelled and generalized by means of a probabilistic model. As a model input the frequency distributions of the exposure levels and the threshold values are used. The simulation results show that the BWI distribution can be reproduced by the (RCR) model distribution, if the data basis is homogenous (data from one branch) and little correlated. On the other hand in case of a heterogeneous data basis (pooled data from different branches) deviations occurred. Nevertheless if heterogeneous data are used the simulation results can be interpreted as generic statements on the attainable safety level.

Key words:

Control-Banding, safety level, evaluation, measurement data, Monte-Carlo-Simulation

1 Einleitung und Überblick

Mit der Entwicklung des Einfachen Maßnahmenkonzeptes Gefahrstoffe (EMKG) [1] hat die BAuA erstmals einen Modellansatz verfolgt, der sich methodisch im Wesentlichen auf die Idee des „Control-Banding“ stützt. Erstmals ausformuliert wurde diese Idee in den COSHH-Essentials [2], die von der britischen HSE als Handlungshilfe für kleine und mittlere Betriebe entwickelt wurden. Im Rahmen dieses Ansatzes werden die gefährlichen Eigenschaften von Stoffen (anhand der Einstufung) zu Gefährlichkeitsgruppen zusammengefasst („Hazard-Banding“) und dann mit anzustrebenden Luftkonzentrationsbereichen verknüpft. Ob diese Konzentrationsbereiche an Arbeitsplätzen eingehalten werden können, entscheidet ein einfaches Expositionsmodell, das als Einflussgrößen lediglich die Menge und das Freisetzungspotenzial des Stoffes sowie die anzuwendenden Schutzmaßnahmen berücksichtigt (s. Abb. 1.1).

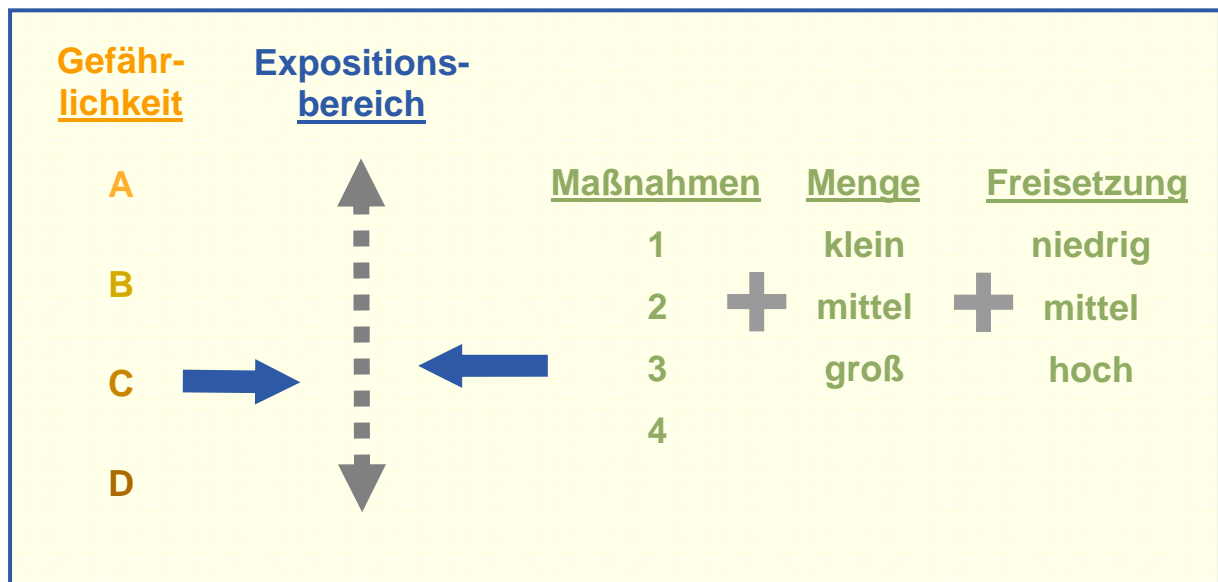


Abb. 1.1 Der Control-Banding Ansatz

Beim Control-Banding handelt es sich also um einen kategorisierenden Ansatz, der die Luftkonzentrationsbereiche der Wirkungs- und Belastungsseite jeweils gegenüberstellt und daraus die für einen sicheren Umgang notwendigen Maßnahmenpakete ableitet. Hierdurch werden Gefahrstoffmessungen bzw. Arbeitsplatzgrenzwerte im Prinzip verzichtbar; das Schutzniveau wird schon dann als ausreichend angesehen, wenn die modellmäßig abgeschätzte Belastung innerhalb oder unterhalb des anzustrebenden Luftkonzentrationsbereiches liegt.

Das EMKG greift diese Prinzipien auf und schlägt ein modifiziertes Control-Banding Modell vor, das sich aber nur im Detail von den britischen COSHH-Essentials unterscheidet (s. Anhang B). So entsprechen die Luftkonzentrationsbereiche den COSHH-Essentials. Lediglich die Zuordnung von R-Sätzen zu den Gefährlichkeitsgruppen wurde leicht verändert. Auch das Expositionsmodell des EMKG wurde nahezu unverändert aus den COSHH-Essentials übernommen. Insbesondere wenn sich die Darstellung auf allgemeinem Niveau bewegt, wird im Folgenden daher der generelle Ausdruck Control-Banding bevorzugt. Sofern die Unterschiede zwischen den

COSHH-Essentials und dem EMKG für die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse bedeutsam sind, wird darauf jeweils gesondert hingewiesen.

Ob die Vorgaben des Control-Banding in der Praxis tatsächlich zu einem ausreichenden Schutz von Arbeitnehmern führen können, ist in der Vergangenheit jeweils für die Wirkungs- und die Belastungsseite getrennt untersucht worden (s. Abschn. 2). Methodisch wurden hierzu die den jeweiligen Luftkonzentrationsbereichen zugeordneten Grenz- bzw. Messwertverteilungen statistisch ausgewertet. Diese getrennte Vorgehensweise hat allerdings den Nachteil, dass Aussagen zum Schutzniveau jeweils auf den Blickwinkel der einen oder anderen Seite verengt werden.

In der vorliegenden Arbeit wird daher ein integriertes Evaluierungsverfahren vorgeschlagen, das versucht, durch Zusammenführung der Wirkungs- und Belastungsseite eine möglichst realistische Gesamtaussage zum Schutzniveau zu erzielen. Ausgangspunkt hierfür ist die Bildung des Bewertungsindex (BWI) bzw. der sog. Risk Characterisation Ratio (RCR), die den Quotienten aus Exposition und Grenzwert darstellen¹. Mit Hilfe dieses Quotienten kann eine konkrete Arbeitsplatzsituation durch eine einzige quantitative Größe charakterisiert werden.

Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Verhältnisse an Arbeitsplätzen im Hinblick auf Stoffeinsatz und Exposition nicht konstant sondern variabel sind. Will man die Variabilität an Arbeitsplätzen abbilden, sind wiederholte Messungen unter wechselnden Bedingungen erforderlich. Erst die hiermit korrespondierenden Häufigkeitsverteilungen der BWI und deren statistische Kennwerte (Perzentile etc.) erlauben Rückschlüsse auf das erreichte Schutzniveau.

Im Rahmen dieser Untersuchung konnten auf der Grundlage von Messdaten aus BAuA Branchenprojekten bzw. Grenzwertlisten (TRGS 900) einige (wenige) Szenarien evaluiert werden. Allerdings ist der hierfür notwendige messtechnische Aufwand erheblich. Deshalb stößt die Zielsetzung „möglichst vollständige messtechnische Evaluierung des Control-Banding Ansatzes“ in der Praxis schnell auf materielle und personelle Grenzen. Es stellt sich daher die Frage, ob wirklich jede im Rahmen des Control-Banding zulässige Arbeitsplatzsituation messtechnisch erfasst werden muss oder ob nicht auch durch Modellbetrachtungen allgemeine Aussagen zum erreichten bzw. erreichbaren Schutzniveau möglich sind.

Einen methodischen Zugang zur Bearbeitung dieser Fragestellung bietet die Wahrscheinlichkeitstheorie (Probabilistik) mit ihren Verfahren zur probabilistischen Modellbildung. Als Modellinput dienen die gefitteten Häufigkeitsverteilungen der Arbeitsplatzgrenzwerte und Messwerte. Aus diesen Modellverteilungen werden dann computergenerierte Zufallszahlen gezogen, die zu dem Quotienten (RCR) aus Messwert und Grenzwert verrechnet werden. Wird die Ziehung häufig wiederholt, erhält man im Ergebnis eine Häufigkeitsverteilung der RCR, die Rückschlüsse auf das jeweilige Schutzniveau erlaubt.

Die Vorteile dieser (zunächst etwas umständlich anmutenden) Monte-Carlo-Simulation sind die größere Flexibilität und Wahlfreiheit in Bezug auf die eingesetzten Verteilungen des Modellinput. Hierdurch eröffnet sich die Möglichkeit, auch Szenario

¹ In dieser Arbeit bezeichnet der BWI den Quotienten aus gemessenen Werten, die RCR den Quotienten aus modellierten Werten.

rien zu simulieren, für die ursprünglich keine Messdaten zur Verfügung stehen. Die größere Wahlfreiheit führt aber gleichzeitig ein Mehr an Unsicherheit in die Simulationsrechnung ein, so dass der Modelloutput eher generischen Charakter hat. Gleichwohl zeigen die Modellergebnisse, dass die Monte-Carlo-Simulation wichtige Hinweise auf das erreichbare Schutzniveau geben kann.

1.1 Hinweise für den Leser

Wie oben ausgeführt, stützt sich der in dieser Arbeit gewählte methodische Ansatz zum einen auf die gängigen Verfahren zur Messung und Bewertung von Luftkonzentrationen am Arbeitsplatz, zum anderen auf die Methoden der probabilistischen Modellbildung. Zwar gehören beide Verfahren jeweils zum Standardrepertoire ihres Fachgebietes, die kombinierte Anwendung auf die Control-Banding Problematik stellt aber für den Arbeitsschutz Neuland dar. Insbesondere die Begrifflichkeiten der probabilistischen Modellierung und das „Denken in Verteilungen“ dürften für die meisten Arbeitsschützer ungewohnt sein. Auch das Control-Banding und die damit verbundene kategorisierende Denkweise gehören längst noch nicht zur Standardausrüstung von Arbeitsschutzexperten, wenn es um die Lösung von konkreten Problemen an Arbeitsplätzen geht.

Um den Zugang zu den Ergebnissen dieser Untersuchung zu erleichtern, erscheinen daher folgende Navigationshinweise angebracht, die der Leser je nach Interessenlage und Vorwissen beherzigen mag:

Grundlegende Voraussetzung für das Verständnis und die richtige Einordnung der Untersuchungsergebnisse sind Detailkenntnisse zum Control-Banding. Besteht hier Informationsbedarf, sollte zunächst der Anhang B „Hintergrund zum Control-Banding Modell des EMKG“ bzw. die Spezialliteratur [3, 4] gelesen werden.

Die Abschnitte 4 und 5 zielen auf eine Beschreibung der wichtigsten Arbeitsbegriffe und führen in die Fragestellung bzw. in den methodischen Ansatz ein. Um etwaige Missverständnissen zu vermeiden, wird die Lektüre dieser Abschnitte auch dem vorinformierten Leser empfohlen, da hier einige der im Arbeitsschutz etablierten Begriffe, wie Schutzniveau, Bewertungsindex etc., in neue Zusammenhänge gestellt bzw. abweichend von der „herkömmlichen“ Bedeutung interpretiert werden.

In dem Abschnitt (5.2) zur probabilistischen Modellbildung wurde auf theoretische Ausführungen zum mathematischen Hintergrund der Monte-Carlo-Simulation weitgehend verzichtet. Der Schwerpunkt liegt eher auf einer qualitativen Beschreibung der praktischen Vorgehensweise, die als erstes Angebot für den Einstieg in die Problematik gedacht ist. Dem stärker theoretisch interessierten Leser wird aber empfohlen, auch den mathematischen Hintergrund der Modellbildung in den Blick zu nehmen. Hierzu sei auf den Anhang A und die Spezialliteratur [5] verwiesen. Erst die (etwas mühsame, aber lohnende) mathematische Formulierung von Wahrscheinlichkeiten ermöglicht ein genaueres Verständnis der Modellierung bzw. zeigt deren Grenzen auf.

2 Stand der Untersuchungen

Ob die Vorgaben des Control-Banding Ansatzes in der Praxis zu einem ausreichenden Schutz von Arbeitnehmern führen können, ist in der Vergangenheit schon verschiedentlich untersucht worden. Während auf nationaler Ebene der Schwerpunkt der Untersuchungen beim EMKG lag, wurden international vorrangig die COSHH-Essentials in den Blick genommen. Methodisch beruhen sämtliche Arbeiten auf einem Vergleich von unabhängigen experimentellen Daten (Grenzwerte, Arbeitsplatzmessungen) mit der oberen bzw. unteren Grenze der Zielkonzentrationsbereiche des Control-Banding. Wenngleich diese Untersuchungen in Bezug auf die festgestellten Fakten recht ähnlich sind, so ergeben sich auf der Ebene der Bewertung je nach eingenommenem Blickwinkel doch deutliche Unterschiede. Erschwert wird die Einordnung der Ergebnisse auch durch die nach Wirkungs- und Belastungsseite getrennte Vorgehensweise.

2.1 Wirkungsseite

Auf toxikologischer Seite hat BROOKE in ihrer grundlegenden Arbeit [3] zu den COSHH-Essentials 111 gesundheitsbasierte Grenzwerte der „UK national list of OEL's“ sowie der deutschen MAK-Liste mit den anzustrebenden Zielkonzentrationsbereichen verglichen. Die Zuordnung zu den Gefährlichkeitsgruppen erfolgte anhand der Legal- bzw. Selbsteinstufung. Der vorgenommene Vergleich zeigt summiert über alle Gefährlichkeitsgruppen für Stäube (33 Stoffe) und Dämpfe (78 Stoffe) ein ähnliches Bild: 42 % der Grenzwerte für Stäube bzw. 56 % der Grenzwerte für dampfförmig auftretende Stoffe liegen innerhalb der anzustrebenden Konzentrationsbereiche. Höher als der anzustrebende Konzentrationsbereich liegen 58 % der Staubgrenzwerte und 41 % der Grenzwerte für Dämpfe. Sämtliche Staubgrenzwerte (100 %) liegen also innerhalb oder oberhalb der anzustrebenden Konzentrationsbereiche. Für die Grenzwerte der dampfförmigen Stoffe liegt dieser Anteil bei insgesamt 97 %, nur jeweils 1 Grenzwert der Gefährlichkeitsgruppe A bzw. C liegt unterhalb des Bereiches. BROOKE schließt daraus, dass bei Einhaltung der anzustrebenden Luftkonzentrationsbereiche am Arbeitsplatz, die COSHH-Essentials im Allgemeinen hinreichend protektive Schutzmaßnahmen vorschlagen.

Im Unterschied zu der eher kategorisierenden Sichtweise von BROOKE zielt die BAuA mit ihrer Analyse des EMKG-Schutzniveaus [6] auf einen Vergleich von Arbeitsplatzgrenzwerten der TRGS 900 [7] (Stand: Mai 2004) mit der Obergrenze (Referenzwert genannt) des anzustrebenden Konzentrationsbereiches. Zu diesem Zweck werden Stoffe, für die sowohl die Einstufung als auch der Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) offiziell festgelegt wurden, den Gefährlichkeitsgruppen des EMKG zugeordnet. Diese Zuweisungen erfolgen für Dämpfe (256 Stoffe) und Stäube (95 Stoffe) getrennt. Für jede Gefährlichkeitsgruppe wird die zugehörige Verteilung der Grenzwerte analysiert und als empirische Verteilungsfunktion beschrieben. Die Grenzwert-Verteilungen für die Gefährlichkeitsgruppen unterscheiden sich zwar in ihrer relativen Lage, streuen aber (innerhalb einer Gefährlichkeitsgruppe) über einen Bereich von zwei bis drei Größenordnungen. Die Verteilungen verlaufen somit so flach, dass sich die Verteilungen benachbarter Gefährlichkeitsgruppen selbst im zentralen 50%-Bereich der Daten teilweise in erheblichem Maße überlappen.

Zur Beurteilung des Schutzniveaus wird die Lage der Referenzwerte in Bezug auf die empirischen Grenzwertverteilungen herangezogen. Bei dieser Sichtweise hängt das Schutzniveau davon ab, ob die Referenzwerte eher im unteren (hohes Niveau) oder oberen Bereich (niedriges Niveau) der empirischen Grenzwert-Verteilung liegen. Die Auswertung zeigt, dass die Referenzwerte für Dämpfe je nach Gefährlichkeitsgruppe mit einer Wahrscheinlichkeit von 57 bis 84 % nicht protektiv sind. Das Schutzniveau bei den Stäuben ist höher. Hier liegen 3 bis maximal 29 % der Grenzwerte unter dem Referenzwert. In der Gesamtschau wird das Schutzniveau insbesondere für Dämpfe und mit Einschränkungen auch für Stäube als gering eingeschätzt.

Es ist anzumerken, dass die Arbeiten zur toxikologischen Evaluierung des Control-Banding Schutzniveaus expositionsseitig lediglich die Bereichsgrenzen des zugrunde liegenden Expositionsmodells ins Kalkül ziehen. Ob diese Bereiche reale Expositionssituationen widerspiegeln, wird bei der Einschätzung des Schutzniveaus nicht berücksichtigt. Das kann zur Folge haben, dass das an Arbeitsplätzen konkret erreichte Schutzniveau deutlich (in der einen oder anderen Richtung) von den o. g. Einschätzungen abweicht. Um eine belastbare Aussage zum Schutzniveau zu erhalten, sind daher die realen Belastungen zu berücksichtigen.

2.2 Expositionsseite

Bereits in der einführenden Arbeit von MAIDMENT [4] zu den COSHH-Essentials wird die Validität des Expositionsmodells auf der Grundlage eines Vergleichs mit betrieblichen Messdaten untersucht. Die Messdaten stammen aus der chemischen Großindustrie und bilden im Wesentlichen die Belastungen bei der Handhabung von Stoffen in geschlossenen Systemen und bei Umfüllprozessen unter lokaler Absaugung ab. Insgesamt stehen nur für einen sehr kleinen Teil möglicher Szenarien vergleichsweise wenige Daten zur Verfügung. Für diese Szenarien bestätigen die Messdaten im Wesentlichen die vorhergesagten Expositionsbereiche. Die zugrunde liegenden Verteilungen werden aufgrund der schmalen Datenbasis allerdings nicht näher charakterisiert.

Ein deutlich größeres Datenkollektiv ($n \approx 1\,000$) stand der BAuA im Rahmen ihrer Evaluierung des COSHH-Essentials Expositionsmodells zur Verfügung [8, 9]. Hier sind insbesondere Messdaten aus Branchenprojekten zu nennen, die in den letzten 15 Jahren z. B. in der Textilindustrie, in Druckereien und in der Möbelindustrie erhoben wurden. Obwohl die ausgewerteten Expositionsdaten ein breites Spektrum von Tätigkeiten und Szenarien abdecken, besteht aber insbesondere für die höheren Schutzstufen noch ein beträchtlicher Mangel an geeigneten Expositionsdaten. Insgesamt wurde für Feststoffe (Stäube) eine verhältnismäßig gute Übereinstimmung zwischen den vorhergesagten Konzentrationsbereichen und den Messwerten gefunden. Für Flüssigkeiten stellt sich die Situation unterschiedlich dar. An Arbeitsplätzen, an denen organische Lösemittel in Litermengen gehandhabt werden, liegen die Messwerte in den vorhergesagten Bereichen oder darunter. Bei der Verwendung von kleinen Lösemittelmengen (ml-Bereich) in Tischlereien gibt es Hinweise, dass Messwerte über den vorhergesagten Belastungsbereichen liegen können.

Zu teilweise anderen Ergebnissen gelangt HARTWIG im Rahmen seiner Evaluierungsstudie [10] zum COSHH-Essentials Expositionsmodell. Datenbasis sind hier 1359 Messwerte aus der chemischen Industrie (Farben-, Lack-, Kunststoff- und

Gummiproduktion). Die Messdaten weisen für die Handhabung von flüssigen Produkten unter lokaler Absaugung eine verhältnismäßig gute Übereinstimmung mit den vorhergesagten Konzentrationsbereichen aus, wenngleich auch hier die Messwerte über 1 - 3 Größenordnungen streuen. Maximal 7 % der Messwerte liegen oberhalb der Bereiche. Anders stellt sich die Situation bei der Handhabung von flüssigen und festen Stoffen in geschlossenen Systemen dar. Hier liegt ein Fünftel bis ein Drittel der Messwerte oberhalb des vorhergesagten Konzentrationsbereiches. HARTWIG bringt diese deutlichen Abweichungen in einen ursächlichen Zusammenhang mit nicht korrekt installierter Technik und mit nicht regelmäßig durchgeführten Wartungsarbeiten. Es wird also deutlich in Frage gestellt, ob die technischen und organisatorischen Vorgaben der COSHH-Essentials an den untersuchten Arbeitsplätzen tatsächlich erfüllt waren. Eine Einschränkung, die den Vergleich mit den Ergebnissen der BAuA und anderer Autoren zum Teil erheblich erschwert.

3 Methodenkritik

In der Gesamtschau der oben vorgestellten Arbeiten erscheint es kaum möglich, eine stimmige Gesamtschätzung des unter Praxisbedingungen erreichbaren Schutzniveaus abzugeben. Schwierigkeiten bereiten insbesondere die nach Wirkung und Exposition getrennten Vorgehensweisen und die damit verbundenen unterschiedlichen Bewertungsansätze und -maßstäbe. Unterschiede in den erhobenen Fakten treten dagegen in den Hintergrund.

Ausgangspunkt für die folgende Diskussion ist zunächst die Feststellung, dass die Evaluierung des Schutzniveaus immer einen Vergleich von Wirkung und Exposition beinhaltet. Aufgrund der Variabilität dieser beiden Einflussgrößen, die sich in (Grenzwert- bzw. Messwert-) Verteilungen ausdrückt, wird dieser Vergleich methodisch aber erheblich erschwert. Zur Verdeutlichung sind die für den Control-Banding Ansatz typischen Verhältnisse in Abbildung 3.1 wiedergegeben.

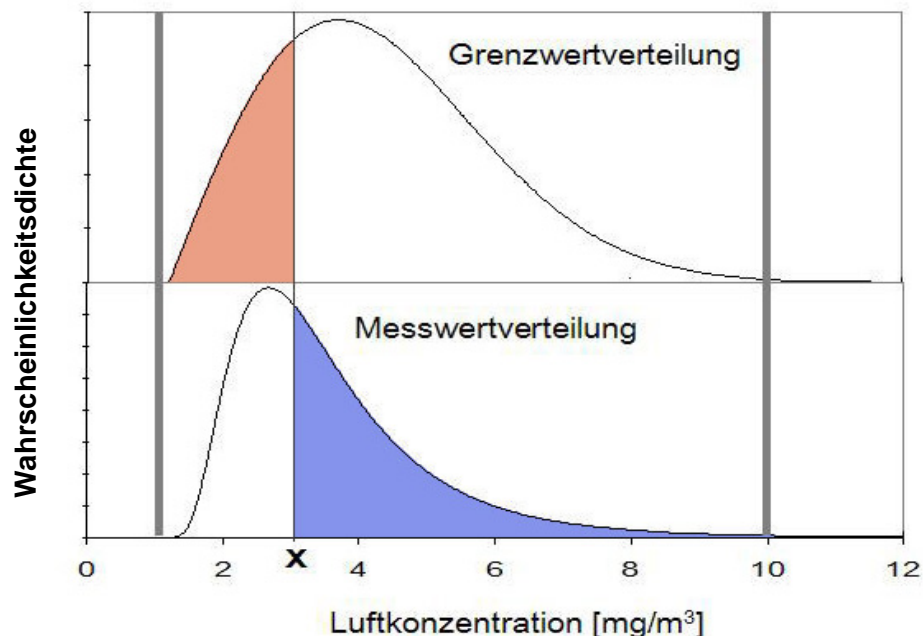


Abb. 3.1 Beispiele für im Rahmen des Control-Banding zulässige Mess- und Grenzwertverteilungen

Exemplarisch dargestellt sind die zu einer Gefährlichkeitsgruppe gehörende Grenzwertverteilung sowie die Messwertverteilung eines korrespondierenden Expositionsszenarios. Die hellgrau eingezeichneten senkrechten Balken repräsentieren den anzustrebenden Luftkonzentrationsbereich ($1 - 10 \text{ mg/m}^3$) bzw. den prognostizierten Expositionsbereich des „Control-Banding“ Modells. Folgt man den Vorgaben des „Control-Banding“, sollte die gezeigte (hypothetische) Konstellation ein ausreichendes Schutzniveau gewährleisten, da anzustrebender Luftkonzentrationsbereich und prognostizierter Expositionsbereich deckungsgleich sind und gleichzeitig sowohl die Grenzwert- als auch Messwertverteilung nahezu vollständig innerhalb dieses Konzentrationsbereiches liegen. Dass aber auch bei Einhaltung dieser Vorgaben nicht immer ein ausreichendes Schutzniveau gewährleistet ist, macht man sich

schnell anhand von Abb. 3.1 klar: Für Grenzwerte unterhalb (hellbrauner Bereich) eines (hier willkürlich gewählten) Wertes x gibt es mit einiger Wahrscheinlichkeit Messwerte, die oberhalb von x liegen (hellblauer Bereich). Das heißt, es ist mit Situationen zu rechnen, in denen Arbeitnehmer möglicherweise nicht ausreichend geschützt sind.

Wie häufig derartige Situationen auftreten können, hängt offensichtlich vom Grad der Überlappung der beiden Verteilungsfunktionen und somit von deren Form und Lage ab. Eine Evaluierung des Schutzniveaus sollte also nach Möglichkeit die gesamte, in den Verteilungsfunktionen enthaltene Information berücksichtigen.

Vor diesem Hintergrund sind auch die Ergebnisse der oben vorgestellten Arbeiten einzuordnen. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden die charakteristischen Perzentile der Grenzwert- bzw. Messwertverteilungen separat berechnet und als Maßzahl für das Schutzniveau bzw. für die Validität des Expositionsmodells interpretiert. Diese zweigleisige, nach Wirkung und Exposition getrennte Vorgehensweise bringt aber Nachteile mit sich:

Die Berechnung von Perzentilen ist in der Regel mit einem Informationsverlust verbunden, da die gesamte in einer Verteilungsfunktionen enthaltene statistische Information (als mehr oder weniger getreues Abbild der jeweiligen Grundgesamtheiten) auf einen Punkt reduziert wird (Punktschätzer). Wird der für die Evaluierung des Schutzniveaus notwendige Vergleich von Wirkung und Exposition anhand von Perzentilen durchgeführt, kommt dieser Informationsverlust ebenfalls zum Tragen. In der Konsequenz sind daran geknüpfte Aussagen zum Schutzniveau mit zusätzlichen Unsicherheiten behaftet und damit schwierig zu interpretieren bzw. weniger belastbar.

4 Abgrenzung des Begriffs „Schutzniveau“

Bisher wurde der Begriff „Schutzniveau“ nicht weiter konkretisiert und bis zu einem gewissen Grade intuitiv verwendet. Für die weitere Diskussion erscheint es aber insbesondere aus methodischer Sicht angezeigt, zunächst eine Präzisierung bzw. Abgrenzung gegenüber anderen Begriffen vorzunehmen.

Den Ausgangspunkt hierfür bildet der Risikobegriff, so wie er im Leitfaden des AGS [11, 12] vorgeschlagen wird. Danach umfasst der Begriff „Risiko“ die Dimensionen: Erwartete Art, erwarteter Schweregrad und erwartete Häufigkeit eines Gesundheitsschadens bei einer gegebenen Belastungssituation. Eine Risikoaussage drückt also eine Erwartung aus und bezieht sich somit auf ein zukünftiges (Schadens-)Ereignis. Quantifiziert wird die Sicherheit dieser Erwartung durch die Angabe einer Eintrittshäufigkeit bzw. -wahrscheinlichkeit.

In Bezug auf das Verhältnis von Risiko und Schutzniveau wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit davon ausgegangen, dass beide Begriffe in den sie konstituierenden Dimensionen identisch sind, auf der Bewertungsebene aber in umgekehrtem Verhältnis zueinander stehen. Das heißt, ein hohes Schutzniveau korrespondiert mit einem niedrigen Risiko und umgekehrt.

Während sich auf qualitativer Ebene ein mehr oder weniger akzeptierter Risikobegriff herausgebildet hat, fehlt auf quantitativer Seite noch weitgehend ein gemeinsames Verständnis. Dies liegt vorrangig an der Komplexität und Abstraktheit des Risikobegriffs und den daraus resultierenden methodischen Schwierigkeiten:

- Zum einen lassen sich Risiken aufgrund ihres Prognosecharakters nicht (wie etwa physikalische Größen) direkt beobachten bzw. messen, sondern nur indirekt mit Hilfe von messbaren *Indikatoren* abbilden. Indikatoren (als messbare Größen) sind somit nicht identisch mit dem Risiko, sondern geben anhand beobachtbarer Sachverhalte lediglich *Hinweise* auf das zugrunde liegende Risiko.
- Des Weiteren können Indikatoren aufgrund der vielen beteiligten Einflussgrößen das Risiko nur partiell abbilden. Werden bei der Auswahl und Festlegung von Indikatoren wichtige Einflussgrößen nicht oder falsch berücksichtigt, stellt dies die Zuverlässigkeit bzw. Vergleichbarkeit der Risikoaussage in Frage.

Vor diesem Hintergrund sind auch die im Bereich des Arbeitsschutzes verwendeten Indikatoren zu interpretieren. Üblicherweise werden hier die Expositionshöhe und der Arbeitsplatzgrenzwert als wichtige Indikatoren herangezogen und zur Risikocharakterisierung mittels Quotientenbildung (Exposition/Grenzwert) zu einem Index zusammengefasst. Je nach Zusammenhang wird dieser Index als Stoff- oder Bewertungsindex (BWI) bzw. als Risk Characterisation Ratio (RCR) bezeichnet. In dieser Arbeit bezeichnet der BWI den Quotienten aus gemessenen Werten (s. Abschn. 5.1), die RCR den Quotienten aus modellierten Werten (s. Abschn. 5.2).

$$\text{RCR} = \frac{\text{Exposition}}{\text{Grenzwert}} \quad (4.1)$$

Allerdings bilden Messgrößen wie der BWI oder die RCR das zugrunde liegende Risiko nur ausschnittsweise ab, da wichtige risikorelevante Faktoren (wie z. B. die Art der Wirkung) quantitativ unberücksichtigt bleiben [13]. Demzufolge ist ein Vergleich derartige Indices nur dann wirklich aussagekräftig, wenn diese Faktoren (wie z. B. die Art der Wirkung, Steilheit der Dosis-Wirkungs-Beziehung etc.) gleich bleiben. Eine Bedingung, die i. d. R. nicht erfüllt ist, wenn unterschiedliche Stoffe (z. B. Stoffe, die einer bestimmten Gefährlichkeitsgruppe zugeordnet sind) betrachtet werden. Insofern ist die vergleichende Risikobewertung von unterschiedlichen Stoffen anhand von Indices (wie es die Evaluierung des Control-Banding erfordert) mit zusätzlichen Unsicherheiten behaftet.

Gleichwohl gilt, dass mit abnehmendem Index (BWI) das Risiko abnimmt. Aus diesem Grunde (und wegen fehlender Alternativen) werden Indices im Folgenden als grobe Kenngröße für das zugrunde liegende Risiko verwendet. Grundsätzlich ist jedoch zu beachten, dass die Verhältnisse an Arbeitsplätzen im Hinblick auf Stoffeinsatz und Exposition nicht konstant, sondern variabel sind. Um die daraus resultierende Variabilität von Risiken (zumindest andeutungsweise) abzubilden, werden deshalb nicht einzelne Indices betrachtet, sondern entsprechende Wertekollektive, die die wechselnden Bedingungen am Arbeitsplatz widerspiegeln. Erst die hiermit korrespondierenden Häufigkeitsverteilungen der Indices und deren statistische Kennwerte (Perzentile etc.) werden als Hinweis auf das erreichte Schutzniveau interpretiert.

5 Fragestellung und methodischer Ansatz

Zur Vorbereitung der weiteren Diskussion ist zunächst zu klären, was genau Gegenstand der Evaluierung ist. Hierzu wird der Begriff des Control-Banding Szenarios eingeführt. Danach werden im Wesentlichen drei Angaben benötigt, um eine Arbeitsplatzsituation eindeutig zu beschreiben:

- **Gefährlichkeitsgruppe** (A, B, C, D, E)
- **Maßnahmenpaket** (CS)
- **Freisetzungspotenzial** (EPL für Flüssigkeiten, EPS für Feststoffe)

So ist ein mittelflüchtiger Stoff der Gefährlichkeitsgruppe A, der in Litermengen gehandhabt wird, durch die (zusätzliche) Angabe CS1 und EPL3 eindeutig beschrieben. Eine solche Kombination aus Gefährlichkeitsgruppe, Maßnahmenpaket und Freisetzungspotenzial wird im Folgenden als Control-Banding Szenario bezeichnet. Diese Systematik wird aus Gründen der Übersichtlichkeit und Vergleichbarkeit auch zur Evaluierung des Einfachen Maßnahmenkonzeptes herangezogen. Bei einem Vergleich von Control-Banding Modellen ist allerdings zu beachten, dass die Zuordnung von Gefährlichkeitsgruppe zu Maßnahmenpaket und Freisetzungspotenzial in den einzelnen Modellen (z. B. COSHH, EMKG) unterschiedlich sein kann (s. Anhang B).

Die Frage, welches Schutzniveau sich durch ein bestimmtes Control-Banding Szenario erreichen lässt, wird mit Hilfe zweier (methodisch aufeinander aufbauender) Ansätze untersucht:

- I. Der erste Ansatz zielt auf eine Evaluierung des Schutzniveaus durch direkten Vergleich von Expositionsmessdaten mit Arbeitsplatzgrenzwerten (AGW). Dazu werden die Messdaten und AGW nach Control-Banding Szenarien gruppiert und dann zu den BWI verrechnet. Zur Charakterisierung und Analyse des Schutzniveaus wird die Variabilität der BWI sowie der korrespondierenden Expositionsmessdaten und AGW jeder Gruppe durch Häufigkeitsverteilungen dargestellt.
- II. In einem zweiten Schritt wird untersucht, ob bzw. unter welchen Bedingungen sich die empirisch gewonnenen BWI-Verteilungen durch Verrechnung der korrespondierenden (gefitteten) Expositions- und Grenzwertverteilung probabilistisch modellieren und somit verallgemeinern, d. h. auf andere (ähnliche) Situationen übertragen lassen.

5.1 Evaluierung des Schutzniveaus anhand von Messdaten

Wichtigste empirische Grundlage für den Evaluierungsprozess sind gut dokumentierte Messdaten, die in verschiedenen Branchenprojekten der BAuA in der Vergangenheit erhoben wurden (zu Aussagekraft, Qualität und Repräsentativität der Daten s. Abschn. 6). Diese Messdaten werden unter Berücksichtigung der Kriterien Gefähr-

lichkeitsgruppe, Freisetzungspotenzial sowie Maßnahmenpaket zunächst den Control-Banding Szenarien zugeordnet. Um branchenspezifische Unterschiede innerhalb eines Control-Banding Szenarios zu identifizieren, erfolgt anschließend eine weitere Differenzierung nach Branchen (s. Abb. 5.1). Eine noch weitere Aufgliederung der branchenspezifischen Teilmengen, z. B. nach Arbeitsprozessen, ist aufgrund der eingeschränkten Datenlage und der daraus resultierenden sehr geringen Zahl der Datenpunkte nicht sinnvoll.

Auf die beschriebene Weise werden Datenteilmengen erzeugt, die mit Hilfe statistischer Methoden (insbesondere Häufigkeitsverteilungen) bezüglich des erreichten Schutzniveaus evaluiert bzw. analysiert werden können. Dabei werden folgende Schritte durchlaufen:

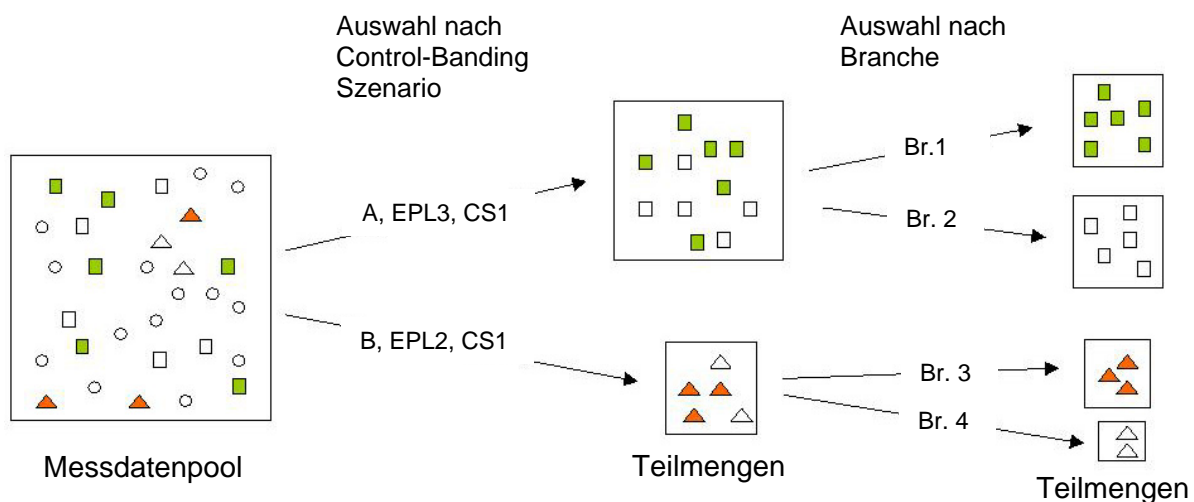


Abb. 5.1 Zerlegung des vorhandenen Datenpools in Teilmengen (die mit \circ bezeichneten Messdaten erfüllen nicht die Auswahlkriterien)

Den Maßgaben der Arbeitsplatzbeurteilung folgend wird zunächst für jeden ausgewählten Messpunkt (in Abb. 5.1 mit \square \blacksquare \triangle \blacktriangle bezeichnet) ein entsprechender Bewertungsindex berechnet. Die hierfür verwendete Rechenvorschrift stützt sich bei Einzelstoffen auf die Vorgaben der TRGS 402 [14] bzw. auf die TRGS 403 [15] sofern Stoffgemische² zu beurteilen sind. Die TRGS 403 definiert den Bewertungsindex (BWI) als Summenwert der Stoffindizes I_i der Stoffe mit Arbeitsplatzgrenzwerten (AGW), wobei der Einzelindex I_i der Quotient aus der für den einzelnen Gefahrstoff festgestellten Konzentration C_i in der Luft am Arbeitsplatz und dem zugehörigen AGW_N ist:

² Grenzwerte für Stoffgemische in der Luft am Arbeitsplatz lassen sich derzeit i. d. R. wissenschaftlich nicht begründen. Bei der Interpretation von Bewertungsindizes muss daher bewusst bleiben, dass es sich um einen pragmatischen Ansatz handelt, der lediglich eine Orientierungshilfe bietet.

$$\text{BWI} = \sum_{i=1}^N I_i = \frac{C_1}{\text{AGW}_1} + \frac{C_2}{\text{AGW}_2} + \dots + \frac{C_N}{\text{AGW}_N} = \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{\text{AGW}_i} \quad (5.1)$$

An dieser Stelle sei angemerkt, dass das Control-Banding typischerweise auf Stoffe zielt, die keinen AGW haben. Andererseits ist der in dieser Arbeit vorgeschlagene Evaluierungsansatz nur dann durchführbar, wenn jeweils ein Grenzwert vorhanden ist. Da es sich bei den gemessenen Stoffen im Wesentlichen um gängige Lösemittel mit entsprechendem AGW handelt, war diese Voraussetzung aber in fast allen Fällen erfüllt (s. a. Abschnitt 6.2).

Inwieweit das Vorhandensein eines Grenzwertes Auswirkungen auf die Höhe der Exposition hat, wird in Abschnitt 8.1 diskutiert.

Die eigentliche Evaluierung des erreichten Schutzniveaus erfolgt anhand von Häufigkeitsverteilungen der BWI (s. Abb. 5.2), die für jede Teilmenge berechnet werden. Eine charakteristische Größe ist hier der relative Anteil [%] der BWI < 1, also der Anteil der Messwerte, die unterhalb des Grenzwertes liegen (in Abb. 5.2 gepunktet dargestellt). Es sei aber an dieser Stelle betont, dass das Schutzniveau nicht nur durch diesen einen Wert charakterisiert wird, sondern durch den gesamten Verlauf der Häufigkeitsverteilung. Jeder einzelne BWI repräsentiert eine im Rahmen des Control-Banding Szenarios zulässige Arbeitsplatzsituation. Insofern spiegeln die Häufigkeitsverteilungen der BWI die Variabilität der Arbeitsplatzsituationen bzw. des korrespondierenden Schutzniveaus für ein Control-Banding Szenario bzw. eine Branche wider.

Schließlich ist anzumerken, dass die ausgewählten Messwerte überwiegend ($\approx 95\%$) personenbezogen ermittelt wurden. Jede Häufigkeitsverteilung kann somit (in erster Näherung) als Stichprobe aus einer entsprechenden (Arbeitnehmer-)Population aufgefasst werden. Inwieweit diese Stichproben als repräsentativ angesehen werden können, wird in Abschn. 6.3 diskutiert.

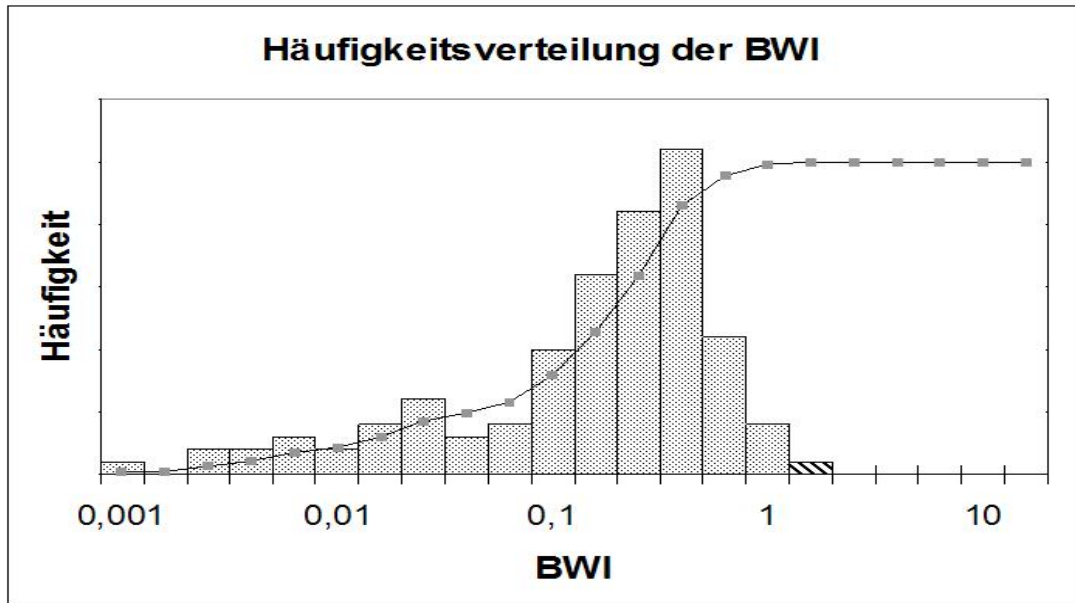


Abb. 5.2 Beispiel einer BWI-Häufigkeitsverteilung für das Control-Banding Szenario: B, EPL2, CS1

5.2 Bildung eines probabilistischen Modells für Einzelstoffe

Grundsätzlich erlaubt die oben beschriebene Vorgehensweise die Evaluierung des Schutzniveaus beliebiger Control-Banding Szenarien. Allerdings ist der hierfür erforderliche Messaufwand erheblich, so dass eine wirklich flächendeckende Evaluierung sämtlicher Control-Banding Szenarien kaum durchzuführen ist. Wenn es daher gelingt, die empirisch gewonnenen Häufigkeitsverteilungen so zu modellieren, dass sie auch auf andere (ähnliche) Control-Banding Szenarien übertragen werden können, ließe sich der experimentelle Aufwand ggf. deutlich reduzieren (s. Abschn. 5.2.1).

Ob, unter welchen Bedingungen und mit welcher Aussagekraft eine Modellierung überhaupt möglich ist, wird mit Hilfe eines probabilistischen Ansatzes untersucht, der die Variabilität der beteiligten Größen durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen abbildet. Welche Verteilungen hier beteiligt sind und in welchem Zusammenhang sie stehen, wird durch Abb. 5.3 für beide Ansätze verdeutlicht:

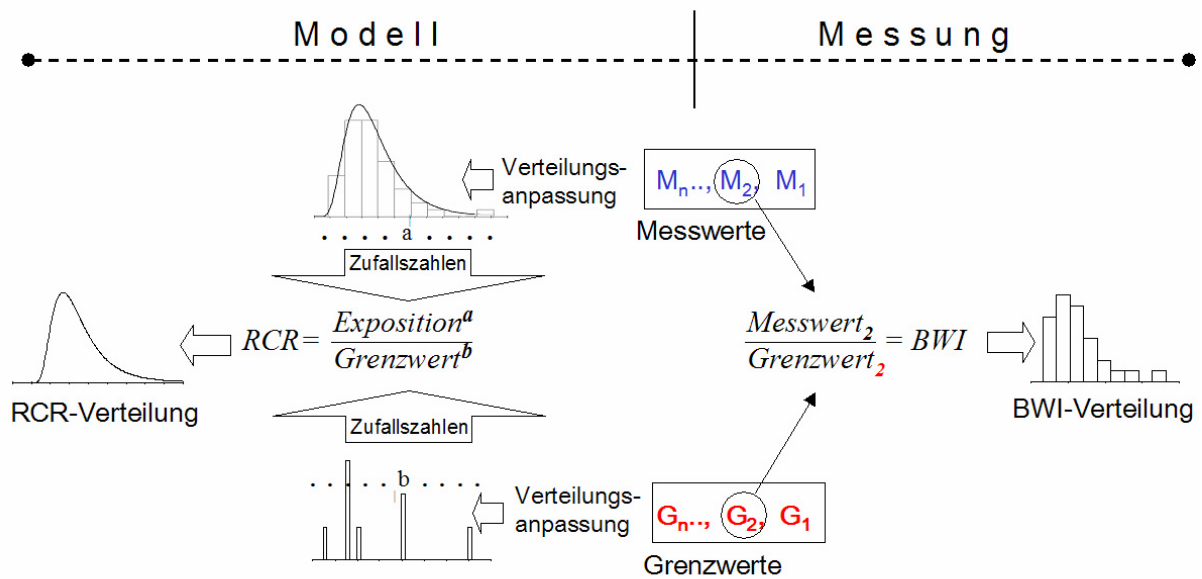


Abb. 5.3 Gegenüberstellung der beiden Vorgehensweisen

In dem Zweig „**Messung**“ spiegelt sich im Wesentlichen das Verfahren für die Behandlung von Messwerten nach TRGS 403 wider. Aus didaktischen Gründen wird zunächst der einfachere (in der Praxis nicht sehr häufige) Fall angenommen, dass an Arbeitsplätzen während einer Schicht nur mit einem Reinstoff umgegangen wird (die Situation für Gemische wird in Abschn. 5.2.2 behandelt). Die Berechnung des BWI reduziert sich dann auf eine einfache Quotientenbildung:

$$BWI = \frac{\text{Messwert}}{AGW} \quad (5.2)$$

Jeder Messwert (in Abb. 5.3 durch M_1, M_2, \dots symbolisiert) repräsentiert die Exposition eines Arbeitnehmers an einem Arbeitsplatz, an dem Umgang mit nur einem Stoff herrscht. Das heißt, jeder Messwert kann mit dem korrespondierenden Stoffgrenzwert (in Abb. 5.3 durch G_1, G_2, \dots symbolisiert) zu einem Bewertungsindex verrechnet werden. Dabei wird M_1 immer nur mit G_1 , M_2 immer nur mit G_2 usw. verrechnet. Liegt eine Anzahl von BWI für verschiedene Arbeitsplätze und Stoffe vor, können entsprechende Häufigkeitsverteilungen berechnet werden, die die Variabilität der BWI widerspiegeln.

Gleichzeitig lassen sich Häufigkeitsverteilungen getrennt für die Expositionsmesswerte und die Grenzwerte berechnen. Es sind also drei Verteilungen im Spiel: die Messwertverteilung, die Grenzwertverteilung und die BWI-Verteilung. Die Messwertverteilung repräsentiert die Variabilität der Exposition an den untersuchten Arbeitsplätzen. Die Grenzwertverteilung gibt Auskunft über die Häufigkeit, mit der die Grenzwertstoffe gemessen wurden. Im Rahmen der Modellbildung wird gefragt, ob bzw. wie sich ein Modell der BWI-Verteilung aus den beiden anderen Verteilungen konstruieren lässt.

In dem Zweig „**Modell**“ ist dargestellt, wie aus den Mess- und Grenzwertdaten die Modellverteilung (als RCR-Verteilung bezeichnet) entsteht. In einem ersten Schritt werden zunächst durch Verteilungsanpassung aus den Häufigkeitsverteilungen Wahrscheinlichkeits(dichte)verteilungen generiert. Dies erfolgt durch geeignete Algorithmen, die in kommerziell erhältlichen Softwarepaketen (z. B. @RISK) implementiert sind. Aus den so erzeugten Wahrscheinlichkeitsverteilungen werden anschließend computergenerierte Zufallszahlen gezogen (man spricht daher von „Monte-Carlo-Simulation“). In Abb. 5.3 sind diese Zufallszahlen mit Exposition^a und Grenzwert^b bezeichnet. Wird der Ziehungsvorgang sehr oft wiederholt, entsteht letztlich durch Sortierung und Kumulierung der RCR-Einzelwerte die RCR-Verteilung als ein Abbild bzw. ein Modell der BWI-Häufigkeitsverteilung.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Modellbildung ist allerdings, dass Expositionshöhe, Grenzwert und RCR Zufallsvariablen sind, die ein zufälliges Ereignis (nämlich eine Arbeitsplatzsituation) repräsentieren und die sich durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschreiben lassen. Erst wenn dies der Fall ist, lassen sich die entsprechenden Ereigniswahrscheinlichkeiten (für Arbeitsplatzsituationen) berechnen. Welche mathematischen Zusammenhänge hier zu beachten und welche Schlussfolgerungen daraus zu ziehen sind, wird in Anhang A dargestellt.

5.2.1 Monte-Carlo-Simulation

Methodisch stützt sich die Monte-Carlo-Simulation im Wesentlichen auf die Erzeugung von Zufallszahlen³ mit Hilfe von Computerprogrammen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Zufallszahlengenerator des EXCEL Add-In @RISK der Firma Palisade verwendet, der Zufallszahlen aus einer Vielzahl von Verteilungen erzeugen kann [16]. @RISK bietet zudem eine Reihe von Möglichkeiten zur Datenaufbereitung, Verteilungsanpassung (BestFit) sowie Auswertung und grafischen Darstellung von Daten. Wie die Monte-Carlo-Simulation abläuft und wie die Simulationsergebnisse zu interpretieren sind, wird anhand der Abb. 5.4 erläutert:

In der Spalte „Modellinput“ sind jeweils die mit dem BestFit Modul von @RISK gefitteten Expositionsverteilungen bzw. Grenzwertverteilungen (gestrichelt) dargestellt. Der Computer generiert jeweils eine Zufallszahl aus der Expositionsverteilung (dargestellt als blauer Punkt) bzw. aus der Grenzwertverteilung (dargestellt als roter Punkt). Das heißt, Häufigkeit und Lage der erzeugten Zufallszahlen sind durch den Verteilungsverlauf vorgegeben. Unter Anwendung der Modellgleichung (5.2) erfolgt anschließend die Verrechnung der Zufallszahlen zur RCR (dargestellt als purpurner Punkt). Wird dieser Vorgang, man spricht auch von „Spiel“, häufig wiederholt, resultiert daraus durch Einsortierung und Kumulierung (schwarze Farbe) der Punkte in Häufigkeitsklassen die gewünschte RCR-Verteilung (Spalte Modelloutput).

Im Hinblick auf die Interpretation der Simulationsergebnisse ist zu betonen, dass die erzeugten Zufallszahlen nicht bloße Rechengrößen sind, sondern mit Arbeitsplatzsituationen in Verbindung gebracht werden können. In Abb. 5.4 sind für ein Control-Banding Szenario am Beispiel „Druckindustrie“ in der Spalte „Arbeitsplatzsituation“

³ Tatsächlich handelt es sich bei computergenerierten Zufallszahlen um Pseudozufallszahlen, die nach einem streng deterministischem Verfahren erzeugt werden, aber zufällig aussehen, d. h. gewisse statistische Tests auf Zufälligkeit erfüllen.

konkrete Situationen dargestellt. Üblicherweise werden in der Druckindustrie eine Reihe von Lösemitteln (als Bestandteil von Druckfarben, Reinigern etc.) eingesetzt, die je nach Arbeitsplatzbedingungen (Lüftung, Stoffmenge etc.) zu mehr oder weniger hohen inhalativen Belastungen von Beschäftigten führen können. Zum Beispiel hat eine wirksame Lüftung (in Abb. 5.4 wird die Wirksamkeit der Lüftung durch die Anzahl der Ventilatoren repräsentiert) in Verbindung mit geringen Mengen niedrige Belastungen zur Folge, wie dies in Spiel Nr. 3 der Fall ist. Mit diesen Arbeitsplatzsituationen korrespondieren entsprechende Luftbelastungen, die als blaue (bzw. schwarze) Punkte unter der (lognormalverteilten) Expositionsverteilungskurve dargestellt sind. Mit zunehmender Spielanzahl nähert sich die Häufigkeitsverteilung der zufällig erzeugten Expositionswerte (schwarze Punkte) der Lognormalverteilung an. Die Lognormalverteilung wird von BestFit als beste Anpassung an die Messdaten ermittelt. Dies deckt sich auch mit der gängigen Auffassung, dass Arbeitsplatzmessdaten i. d. R. lognormal verteilt sind [17].

Anders stellt sich die Situation in Bezug auf die Grenzwertverteilung dar. Wie häufig Lösemittel einer bestimmten Gefährlichkeitsgruppe in der Druckindustrie angetroffen und gemessen werden und welche Grenzwertverteilung daraus resultiert hängt in der Regel nicht von den Expositionsdeterminanten, wie z. B. Lüftung und Stoffmenge ab, sondern wird vielmehr durch die technologische Stoffeigenschaften (Lösevermögen, Druckeigenschaften, Viskosität etc.), betriebswirtschaftliche Gesichtspunkte etc. bestimmt. Das heißt, die Grenzwertverteilung ist das Ergebnis eines komplexen Auswahlprozesses, der unter technologischen Vorgaben, ökonomischen Kriterien, Modeströmungen, Arbeitsschutzgesichtspunkten etc. abläuft. Deshalb folgt die Verteilung in der Regel auch keinem einfachen Muster (wie z. B. lognormalverteilt), sondern kann im Prinzip beliebige Formen annehmen. Aus diesem Grunde muss die Verteilungsanpassung möglichst flexibel gestaltet werden, ohne dass es jedoch zu einem Overfitting kommt. Im Sinne einer Kompromisslösung werden daher in dieser Arbeit die Grenzwertverteilungen durch Histogrammverteilungen (s. Anhang A.4) angenähert.

Schwierig zu beantworten ist die Frage, ob die in der Stichprobe erhobenen Messwert- und Grenzwertdaten die jeweiligen Grundgesamtheiten abbilden und somit als repräsentativ angesehen werden können. Insbesondere wegen der vergleichsweise geringen Stichprobenumfänge und der vielen Einflussgrößen ist eine befriedigende Prüfung auf Repräsentativität nicht möglich. Gleichwohl sollte das Datenmaterial aber erste Hinweise auf die zugrunde liegende betriebliche Wirklichkeit geben (s. Abschn. 6.3).

Schließlich ist zu berücksichtigen, dass das Expositionsniveau mit der Höhe des Grenzwertes korrelieren kann. Wenn (positive) Korrelationen auftreten, müssten niedrige Expositionen mit niedrigen Grenzwerten einhergehen bzw. hohe Expositionen mit hohen Grenzwerten. Ob derartige Korrelationen in dem untersuchten Datenmaterial tatsächlich beobachtet werden konnten, wird in Abschn. 8.1 näher dargestellt. In jedem Fall sind im Rahmen einer Monte-Carlo-Simulation Korrelationen zwischen den Eingangsgrößen (Exposition, Grenzwert) zu berücksichtigen, da dies den Modelloutput erheblich beeinflussen kann (s. Anhang A.3).

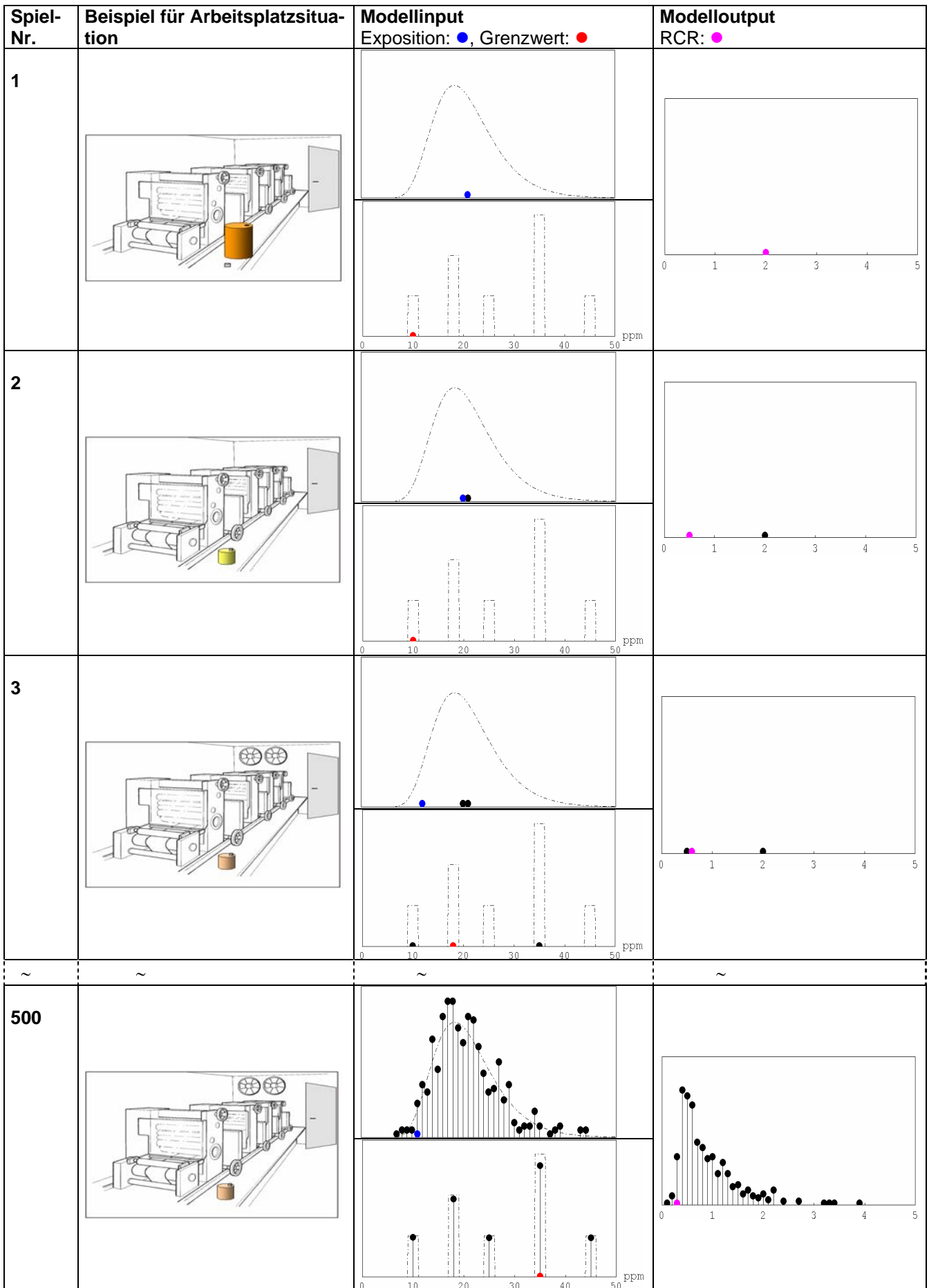


Abb. 5.4 Beispielsequenz für eine Monte-Carlo-Simulation (Spielzahl n = 500)

5.2.2 Modellbildung für Gemische

Bisher wurde von der (vereinfachenden) Modellannahme ausgegangen, dass an Arbeitsplätzen ausschließlich reine Stoffe gehandhabt werden. In der Praxis ist dieser Fall jedoch eher die Ausnahme. Der Regelfall sind Stoffgemische, die je nach Flüchtigkeit und Anzahl der Stoffe zu mehr oder weniger komplexen Dampf-/Luftgemischen⁴ führen können.

Die Bewertung solcher Gemische erfolgt durch Summenbildung über alle Komponenten mit AGW. Grundlage für die Bewertung aus regelungstechnischer Sicht ist die TRGS 403. Als Bewertungsmaßstab verwendet die TRGS 403 den Bewertungsindex, der als Summe der Stoffindices definiert ist (s. Gl. 5.1). Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei dieser Summenbildung um einen pragmatischen Ansatz ohne belastbaren wissenschaftlichen Hintergrund. Gleichwohl gilt, dass mit abnehmendem Bewertungsindex auch das Risiko tendenziell abnimmt. Aus diesem Grunde, aber auch wegen der Einfachheit und Übersichtlichkeit, wird in dieser Arbeit der Ansatz der TRGS 403 beibehalten. Die Übertragung dieses Ansatzes auf die Monte-Carlo-Simulation gestaltet sich wie folgt:

Zum besseren Verständnis sei noch einmal an die Verfahrensweise bei Einzelstoffen erinnert. Hier wurde der BWI als Quotient aus jeweils einem Messwert und einem Grenzwert gebildet. Dementsprechend musste in der Monte-Carlo-Simulation zur Berechnung der RCR-Verteilung (pro Spiel) jeweils nur eine Zufallszahl für den Messwert bzw. für den Grenzwert erzeugt werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wäre es wünschenswert, wenn die Monte-Carlo-Simulation auch für Stoffgemische (pro Spiel) mit jeweils einer Zufallszahl für den Expositionswert bzw. den Grenzwert auskommen könnte⁵.

Um zu verstehen, wie dies erreicht werden kann, sei daran erinnert, dass die Berechnung des BWI formal auf eine einfache Quotientenbildung (aus einem Expositionswert und einem Grenzwert) zurückgeführt werden kann. Wie sieht aber der Expositionswert bzw. der Grenzwert für ein Gemisch aus?

Im Fall des Expositionswertes wird dies einfach durch Summenbildung erreicht. Das heißt, die Exposition gegenüber dem Dampfgemisch und somit der Expositionswert wird als Summe C_{ges} der Einzelkomponenten berechnet:

⁴ In der Praxis können natürlich auch Staubgemische auftreten. In der vorliegenden Arbeit werden Staubgemische allerdings nicht näher betrachtet, da in der Regel keine analytisch-chemischen Daten zur deren Zusammensetzung vorlagen.

⁵ Grundsätzlich sind auch andere bzw. komplexere Modelle denkbar, die z. B. die Zusammensetzung von Gemischen über eine Anzahl von Verteilungen abbilden. Angesichts der bestehenden Unsicherheiten im Hinblick auf die toxikologische Wirkung von Stoffgemischen ist es allerdings fraglich, ob solche Modelle tatsächlich zu einem Erkenntniszugewinn führen würden.

$$C_{\text{ges}} = C_1 + C_2 + \dots C_N \quad (5.3)$$

Etwas schwieriger ist die Formulierung eines entsprechenden Gemischgrenzwertes (als KGW bezeichnet) einzusehen. Ausgehend von Gl. 5.3 und Gl. 5.4 ist zu fragen, welche mathematische Form ein solcher Grenzwert haben muss.

$$\text{BWI} = \frac{C_1}{\text{AGW}_1} + \frac{C_2}{\text{AGW}_2} + \dots \frac{C_N}{\text{AGW}_N} \quad (5.4)$$

Die für die Ableitung aus mathematischer Sicht wichtigste Forderung ist, dass die Berechnung des BWI nach Gl. 5.4 und die Berechnung des BWI aus C_{ges} und dem entsprechenden Gemischgrenzwert (KGW) äquivalent sind. Das heißt, es gilt:

$$\text{BWI} = \frac{C_{\text{ges}}}{\text{KGW}} = \frac{C_1}{\text{AGW}_1} + \frac{C_2}{\text{AGW}_2} + \dots \frac{C_N}{\text{AGW}_N} \quad (5.5)$$

Daraus folgt:

$$\text{KGW} = \frac{C_1 + C_2 + \dots C_N}{\text{BWI}} \quad (5.6)$$

oder

$$\text{KGW} = \frac{1}{\frac{C_1}{(C_1 + C_2 + \dots C_N) \cdot \text{AGW}_1} + \frac{C_2}{(C_1 + C_2 + \dots C_N) \cdot \text{AGW}_2} + \dots \frac{C_N}{(C_1 + C_2 + \dots C_N) \cdot \text{AGW}_N}} \quad (5.7)$$

Die Abkürzung KGW steht für **K**onzentrationsgewichteter **G**renzwert. Diese Bezeichnung wurde gewählt, weil das Verhältnis $C_x / (C_1 + C_2 + \dots C_N)$ das Gewicht des jeweiligen Arbeitsplatzgrenzwertes AGW_x in Gl. 5.7 bestimmt.

6 Datenbasis

Eine Evaluierung ist immer nur so gut wie die zugrunde liegende Datenbasis. Im Folgenden wird jeweils für die Expositions- und Wirkungsseite kurz beschrieben, welche Datenquellen verwendet wurden und welche Qualitäts- und Auswahlkriterien dabei zur Anwendung kamen. Darüber hinaus wird die Frage nach der Repräsentativität der Daten kurz diskutiert.

6.1 Expositionsdaten

Wichtigste Quelle für Messdaten waren Branchenprojekte der BAuA aus den letzten 15 Jahren. Es standen insgesamt 7 Studien aus verschiedenen Industriebereichen zur Verfügung (s. Tab. 6.1). Darüber hinaus wurden Messdaten aus TRK-Begründungen und aus EU-Altstoffberichten ausgewertet. Diese Quellen erreichen aber bei weitem nicht den Detailliertheitsgrad der BAuA-Studien, so dass nur in vergleichsweise wenigen Fällen eine Zuordnung zu Control-Banding Szenarien möglich war. In Zweifelsfällen wurden Messpunkte nicht berücksichtigt.

Tab. 6.1 Datenquellen

Datenquelle	Bereich	Anzahl Datenpunkte		Zeitraum
		Flüssigkeit	Feststoffe	
[Gmehling, 1991]	Textilindustrie	49	35	1991
[Gmehling, 1993]	Kunststoff- verarbeitung		24	1993
[Rentel, 1991b]	Gummi- herstellung		29	1991
[Auffarth, 1998]	Siebdruck	152		1998
[Görner, 1996]	Offsetdruck	220		1996
[Auffarth, 2004]	Möbel- herstellung	37		2001
[Auffarth, 2001]	Optikerhandwerk	58		2001
Existing substan- ces data	Chemische Industrie, (allg.)	60	16	1991 -1998
TRK- Begründungen [AGS, 1997]	Chemische Industrie	156	122	1990 -1997

Wenngleich es Unterschiede hinsichtlich der Detailliertheit der Dokumentation gibt, so teilen nahezu alle berücksichtigten Messdaten einige Merkmale (eine ausführliche Darstellung findet sich in [9]):

- Die Arbeitsplatzmessungen wurden nach den Maßgaben der TRGS 402 durchgeführt.
- Die Probenahmedauern liegen im Bereich zwischen 1 und 4 Stunden und decken typischerweise die Dauer von expositionsrelevanten Tätigkeiten ab. Um die Expositionswerte (als Schichtmittelwerte) miteinander vergleichen zu können, wird angenommen, dass die expositionsrelevante Tätigkeit über die gesamte Schicht andauert⁶.
- Die überwiegende Mehrheit der Daten wurde durch personenbezogene Messungen gewonnen. Nur etwa 5 % der Messwerte gehen auf stationäre Probenahme zurück.
- Fast alle gemessenen⁷ flüssigen Stoffe haben Arbeitsplatzgrenzwerte, die in der TRGS 900 gelistet sind. Das heißt, für nahezu alle flüssigen⁸ Stoffe konnten BWI berechnet werden.
- Die Mehrheit der Messdaten stammt aus kleinen und mittleren Unternehmen.

In Bezug auf die Erhebung der Messdaten ist anzumerken, dass in den kleinen und mittleren Betrieben der Control-Banding Ansatz nicht bekannt war. Das heißt, die vor Ort vorgefundenen Schutzmaßnahmen wären sämtlich auf der Grundlage anderer Vorgaben, Regelungen und Erfahrungen identifiziert und umgesetzt worden. Gleichwohl wurde bei der Auswahl der Daten darauf geachtet, dass die Vorgaben des Control-Banding zum Zeitpunkt der Messung im Grossen und Ganzen erfüllt waren. Allerdings wurden an einigen Arbeitsplätzen in Bezug auf die ergriffenen Schutzmaßnahmen auch Mischsituationen angetroffen. Z. B. wurde in Druckereibetrieben bei Umfüll- und Reinigungsarbeiten offen (Maßnahmenlevel 1) mit Lösemittelzubereitungen umgegangen, gleichzeitig waren Druckmaschinen an Absaugeinrichtungen (Maßnahmenlevel 2) angeschlossen. In diesen Fällen wurde der Maßnahmenlevel 1 für die expositionsmäßig im Vordergrund stehenden Umfüll- und Reinigungstätigkeiten zugrunde gelegt.

6.2 Grenzwertdaten

Wie bereits oben erwähnt, haben nahezu alle gemessenen flüssigen Stoffe einen Arbeitsplatzgrenzwert (zu Feststoffen s. S. 27, Fußnote 8). Für die gestellte Evaluierungsaufgabe ist es erforderlich, die Stoffe anhand der R-Sätze den Gefährlichkeitsgruppen des EMKG zuzuordnen. Diesbezüglich wird vollständig auf die Arbeit von

⁶ In Bezug auf ein reales zeitliches Expositionsmuster, das oftmals auch Zeiträume ohne Exposition beinhaltet, bildet diese Annahme also den worst case ab.

⁷ Stoffe ohne AGW und/oder Stoffe mit sehr niedrigen Luftkonzentrationen wurden bei der Berechnung des BWI nicht berücksichtigt.

⁸ Stäube wurden in der Regel unspezifisch gravimetrisch, als einatembare Fraktion gemessen. Das heißt, eine chemisch analytische Bestimmung der Einzelkomponenten erfolgte nicht und somit auch keine Berechnung von Einzelstoffindices.

RUPPRICH et al. [18] zurückgegriffen. Ausgangspunkt der Arbeit sind die Stoffe der TRGS 900 (244 Stoffe). Von diesen Stoffen können 188 Dämpfe und 56 Stäube anhand ihrer Legaleinstufung (gemäß Anh. I der RL 67/548/EWG; 28. ATP) den Gefährlichkeitsgruppen A bis E zugeordnet werden. Werden einem Stoff im Rahmen der Legaleinstufung mehrere R-Sätze zugeordnet, die jeweils verschiedene Gefährlichkeitsgruppen anzeigen, dann wird der Stoff der kritischsten Gefährlichkeitsgruppe zugeordnet.

Tab. 6.2 Verteilung der AGW der TRGS 900 (Stand: Januar 2006) auf die Gefährlichkeitsgruppen

Dämpfe		Stäube	
Gefährlichkeitsgruppe	Anzahl AGW	Gefährlichkeitsgruppe	Anzahl AGW
A	49	A	3
B	54	B	16
C	43	C	21
D	28	D	16
E	14	E	
	Σ 188		Σ 56

Im Rahmen der Arbeit von RUPPRICH et al. erfolgten zunächst die Zuordnung der Stoffe zu Gefährlichkeitsgruppen und anschließend die Zusammenstellung der korrespondierenden Grenzwerte in EXCEL-Tabellen. Diese tabellierten Grenzwerte werden bei der Berechnung der Bewertungsindices und deren Zuordnung zu Gefährlichkeitsgruppen generell zugrunde gelegt.

6.3 Repräsentativität

Repräsentativität gilt als eines der wichtigsten Gütekriterien für Stichproben in empirischen Untersuchungen. So grundlegend der Begriff oder der Anspruch „Repräsentativität“ ist, so uneinheitlich ist dessen Verwendung und Definition.

Die gängige Vorstellung von Repräsentativität lässt sich wohl am besten folgendermaßen beschreiben [19]: Die Auswahl einer Teilgesamtheit ist so vorzunehmen, dass „aus dem Ergebnis der Teilerhebung möglichst exakt und sicher auf die Verhältnisse der Gesamtmasse geschlossen werden kann.“ Dies ist dann der Fall, „wenn sie [die Teilerhebung] in der Verteilung aller interessierenden Merkmale der Gesamtmasse entspricht, d. h. ein zwar verkleinertes, aber sonst wirklichkeitstreu abgebildetes Abbild der Gesamtmasse darstellt.“ Übertragen auf das Problem der Risikoevaluierung bzw. -modellierung bedeutet diese Forderung, dass sämtliche risikobestimmenden Merkmale (dies ist eine lange Liste von Expositions- und Grenzwertdeterminanten) sowohl in der Stichprobe als auch in der Grundgesamtheit die gleiche Struktur aufweisen. Das Problem besteht allerdings darin, dass gerade die Verteilung dieser „interessie-

renden Merkmale“ in der Grundgesamtheit unbekannt ist und aus ökonomischen und Praktikabilitätsgründen auch nicht vollständig erhoben werden kann.

Im Prinzip lässt sich die Präzision statistischer Aussagen erhöhen, wenn bekannte Informationen über die Grundgesamtheit in den Prozess der Stichprobenziehung einbezogen werden. Sind z. B. die Anzahlen der Siebdruck- und Offsetdruckbetriebe bekannt und will man eine möglichst getreue Abbildung dieser Verhältnisse erzielen, so kann man eine proportional geschichtete Stichprobe ziehen, in dem man genau so viele Betriebe auswählt, wie es dem zahlenmäßigen Anteil entspricht.

Möglich ist auch die Ziehung einer disproportional geschichteten Stichprobe, die sich dann ergibt, wenn die Größe der Stichprobe innerhalb einer Schicht (z. B. Offsetdruckbetriebe) nicht von dem relativen Anteil der Schicht in der Grundgesamtheit abhängt, sondern möglicherweise gleich ist. Zur Schätzung der statistischen Kennwerte, z. B. für den Offsetdruck, ist es in diesem Fall nicht erforderlich, das anteilmäßige Verhältnis der Offsetdruckbetriebe an der gesamten Druckindustrie (Grundgesamtheit) zu berücksichtigen. Dieses Verhältnis muss jedoch (über eine geeignete Wichtung) bei der Ermittlung von Kennwerten der gesamten Druckindustrie beachtet werden.

Grundsätzlich können also geschichtete Stichproben die Präzision von statistischen Aussagen erhöhen, wenn bereits Informationen über die Zusammensetzung der Grundgesamtheit vorliegen. Allerdings werden derartige Informationen im Rahmen von Branchenprojekten nur in Ausnahmefällen erhoben, so dass Daten zum Gewicht von Subpopulationen nicht vorliegen und daher auch nicht berücksichtigt werden können.

Um ein möglichst genaues Abbild der Grundgesamtheit zu erhalten, wird im Allgemeinen auf das Konzept der Zufallsauswahl zurückgegriffen. Das heißt, jedes Element der Population hat grundsätzlich die gleiche Chance, in die Stichprobe zu kommen. Inwieweit die im Rahmen von Branchenprojekte erhobenen Daten als „zufällig ausgewählt⁹“ angesehen werden können, ist nur sehr schwer beurteilbar. Dies liegt zum einen an der großen Anzahl von Merkmalen, die die Grundgesamtheit kennzeichnen. Zum anderen an den vergleichsweise kleinen Stichprobenumfängen. So wurden beispielsweise in der Siebdruckbranche von den 550 gewerblichen Siebdruckereien, 1 500 nebenbetrieblichen Druckereien und ca. 2 000 - 3 000 Fertigungsstätten mit industriellem Siebdruck lediglich 11 Betriebe untersucht. Eine ähnliche Situation liegt auch bei den anderen Branchen vor.

Insgesamt ist festzustellen, dass die im Rahmen von Branchenprojekten erhobenen Daten nur einen Ausschnitt möglicher Expositions-/Risikoszenarien abbilden und insbesondere aufgrund der vergleichsweise geringen Stichprobenumfänge nicht abschließend auf Repräsentativität geprüft werden können.

⁹ Im Rahmen der Branchenprojekte stand der Aspekt „Zufallsauswahl“ nicht im Vordergrund. Vielmehr orientierte sich die Betriebsauswahl an bereits bestehenden Kontakten zu Firmen, Verbänden, Institutionen etc.

7 Evaluierung des Schutzniveaus anhand der BWI-Häufigkeitsverteilungen

Um aus den in Abschnitt 6 charakterisierten empirischen Daten Aussagen zum Schutzniveau eines Control-Banding Szenarios zu gewinnen, muss zunächst im Rahmen eines Auswahlprozesses geprüft werden, welche Daten überhaupt Control-Banding Szenarien zugeordnet werden können. Erst nach Abschluss dieses Auswahlprozesses kann für jeden Messpunkt der entsprechende Bewertungsindex berechnet werden. Die eigentliche Evaluierung des Schutzniveaus erfolgt anhand von Häufigkeitsverteilungen der BWI.

7.1 Auswahl der Daten

Die Auswahl bzw. Zuordnung der Messdaten orientiert sich im Wesentlichen an den Determinanten des Control-Banding. Welche Control-Banding Szenarien, d. h., welche Kombinationen aus Gefährlichkeitsgruppe, Freisetzungspotenzial und Maßnahmenpaket zu berücksichtigen sind, wird durch die Vorgaben des Einfachen Maßnahmenkonzeptes bestimmt (s. Tabelle B.4.1 u. B.4.2, Anhang B). So muss z. B. ein Stoff der Gefährlichkeitsgruppe B mit dem Freisetzungspotenzial EPL2 unter guten Lüftungsbedingungen (CS1) gehandhabt werden. Das heißt, diese Bedingungen müssen (idealerweise) in den Betrieben bei der Erhebung der Messdaten erfüllt gewesen sein¹⁰.

Es ist anzumerken, dass im Rahmen der Branchenprojekte in der Regel Stoffgemische in der Luft an den Arbeitsplätzen nachgewiesen wurden. Sofern Gemische zu beurteilen sind, sagen die Regeln des Control-Banding, dass der Stoff mit der höchsten Gefährlichkeit (Gefährlichkeitsgruppe) die Gefährlichkeitsgruppe des Gemisches bestimmt. Das heißt aber auch, dass ein der Gefährlichkeitsgruppe B zugehöriges Gemisch Stoffe der (nächst niedrigeren) Gefährlichkeitsgruppe A enthalten kann.

Die stoffliche Zusammensetzung der verwendeten flüssigen Zubereitungen wurde in den Branchenprojekten nicht erhoben, so dass exakte Konzentrationsangaben in der Regel nicht zur Verfügung stehen. Hilfsweise musste daher auf die gemessenen Luftkonzentrationen zurückgegriffen werden. Die Zuordnung eines Messpunktes zu einer Gefährlichkeitsgruppe orientiert sich also nicht an der Stoffkonzentration in der Zubereitung, sondern an der gemessenen, relativen¹¹ Luftkonzentration. Hierzu wird ein Vergleich der relativen Luftkonzentration des Stoffes mit der Einstufungsgrenze

¹⁰ An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass an einigen Arbeitsplätzen in Bezug auf die ergriffenen Schutzmaßnahmen auch Mischsituationen angetroffen wurde. Zum Beispiel wurde in Druckbetrieben bei Umfüll- und Reinigungsarbeiten offen (CS1) mit Lösemittelzubereitungen umgegangen, gleichzeitig waren Druckmaschinen an Absaugeinrichtungen (CS 2) angeschlossen. In diesen Fällen wurde CS1 für die expositionsmäßig im Vordergrund stehenden Umfüll- und Reinigungstätigkeiten zugrunde gelegt.

¹¹ Als relative Luftkonzentration wird der Quotient aus der Luftkonzentration des betrachteten Stoffes und der Summe der Luftkonzentrationen aller Stoffe für einen bestimmten Messpunkt bezeichnet. Es wird darüber hinaus vereinfachend angenommen, dass die Konzentration in der Zubereitung proportional zur Konzentration in der Luft ist, die gemessenen Stoffe aus einer einzigen Zubereitung stammen und die Stoffe ähnliche Flüchtigkeiten aufweisen.

nach Richtlinie 88/379/EU vorgenommen. Nur Stoffe, deren relative Luftkonzentration oberhalb der Einstufungsgrenze liegt, werden berücksichtigt. Die Zuordnung eines Messpunktes zu einer Gefährlichkeitsgruppe wird schließlich durch den Stoff mit der höchsten Gefährlichkeitsgruppe bestimmt.

Die Wahrscheinlichkeit, dass durch die o. g. Annahmen Fehlzusordnungen auftreten, ist relativ gering, da die relative Luftkonzentration der betrachteten Stoffe deutlich über den jeweiligen (vergleichsweise niedrigen) Einstufungsgrenzen rangiert.

Aufgrund der insgesamt recht anspruchsvollen Auswahlkriterien, konnten nur für zwei Control-Banding Szenarien (Gefährlichkeitsgruppe A, EPL3, CS1 und Gefährlichkeitsgruppe B, EPL2, CS1) geeignete betriebliche Messdaten gefunden werden. Während für das Szenario EPL3, CS1 lediglich Messdaten aus Offsetdruck-Betrieben ausgewertet werden konnten, standen für das Szenario EPL2, CS1 Messdaten aus verschiedenen Branchen (Siebdruck, Optik, Möbel) zur Verfügung, so dass branchenspezifische Teilmengen erzeugt werden konnten (zum methodischen Hintergrund s. auch Abschn. 5.1). Es ist somit möglich ggf. statistisch zu prüfen, ob innerhalb eines Control-Banding Szenarios branchenspezifische Unterschiede auftreten. Eine weitere Aufgliederung der branchenspezifischen Teilmengen, z. B. nach Arbeitsprozessen, ist aufgrund der eingeschränkten Datenlage und der daraus resultierenden sehr kleinen Teildatenmengen allerdings nicht möglich bzw. sinnvoll.

Schließlich ist festzuhalten, dass für Feststoffe keine stoffspezifischen Daten zur Verfügung stehen. Stäube wurden in der Regel unspezifisch (gravimetrisch) als einatembare oder alveolengängige Fraktion gemessen. Das heißt, eine chemisch analytische Bestimmung der Einzelkomponenten erfolgte nicht und somit auch keine Berechnung von Bewertungsindices.

7.2 Ergebnisse

Nach Zuordnung der Mess- und Grenzwertdaten zu den Control-Banding Szenarien erfolgt die Berechnung der Bewertungsindices für jeden einzelnen Arbeitsplatz unter Anwendung von Gl. 5.1. Anschließend werden diese betriebs- bzw. arbeitsplatzbezogenen Daten für die betrachteten Branchen zusammengefasst (gepoolt) und statistisch ausgewertet. Um den Verlauf der Häufigkeitsverteilung zumindest grob zu charakterisieren, werden Histogramme berechnet und für ausgewählte BWI-Werte (BWI >10, >1, <1, <0,1, <0,01) die Prozentanteile angegeben. Der Vergleich und die Bewertung der Verteilungen erfolgt anhand der statistischen Kennzahlen und durch visuelle Inspektion der Histogramme. Sämtliche Berechnungen wurden mit Hilfe von MS EXCEL durchgeführt.

7.2.1 Control-Banding Szenario: Gefährlichkeitsgruppe A, EPL3, CS1

Für dieses Szenario liegen ausschließlich Messwerte zu Propan-2-ol aus Offsetdruckbetrieben [9, 21] vor. Propan-2-ol wird im Offsetdruck als Feuchtmittel typischerweise in Litermengen eingesetzt. Unter Berücksichtigung eines Siedepunktes von 82 °C führt dies zur Freisetzungsguppe EPL3. Der in der TRGS 900 gelistete Luftgrenzwert für Propan-2-ol liegt bei 200 ppm. Es liegt also keine Grenzwertverteilung vor, sondern nur ein diskreter Grenzwert. Demgegenüber stehen 220 Messwer-

te zur Verfügung, die nach Berechnung der entsprechenden Bewertungsindices und deren Einsortierung in Häufigkeitsklassen das in Abb. 7.1 dargestellte Histogramm ergeben (die Abszisse ist logarithmisch skaliert!).

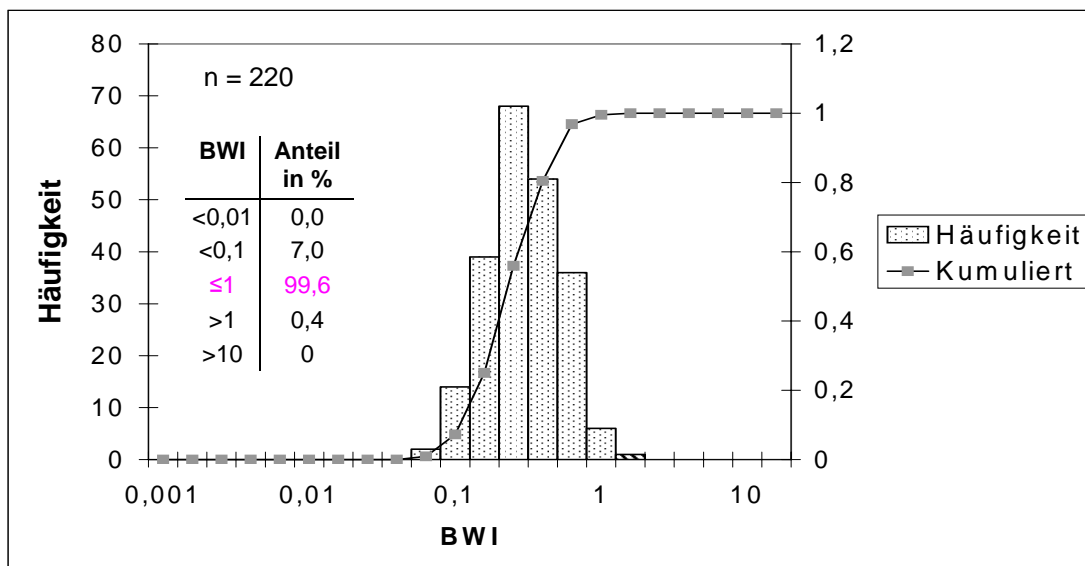


Abb. 7.1 Häufigkeitsverteilung der BWI für das Szenario EPL3, CS1

Abb. 7.1 verdeutlicht, dass offenbar nur sehr wenige Grenzwertüberschreitungen festgestellt wurden. Nur 0,4 % der BWI sind >1. Insgesamt deutet die BWI-Verteilung auf ein ausreichendes Schutzniveau hin.

7.2.2 Control-Banding Szenario: Gefährlichkeitsgruppe B (+A)¹², EPL2, CS1

Für dieses Szenario stehen Messwerte aus Siebdruckbetrieben, Optikerwerkstätten und aus dem Bereich der Möbelherstellung zur Verfügung. Typischerweise werden in diesen Bereichen eine Reihe von organischen Lösemitteln als Bestandteil von Reinigungsmitteln, Klebstoffen, Druckfarben etc. eingesetzt, die zu luftgetragenen Belastungen führen. Abb. 7.2 zeigt die entsprechenden BWI-Verteilungen in Form von Histogrammen bzw. Summenkurven. In den drei Branchen liegen nahezu alle Bewertungsindices unterhalb von 1. Lediglich im Bereich der Möbelherstellung wurde 1 Grenzwertüberschreitung festgestellt. Für diese Branche steht jedoch nur eine sehr schmale Datenbasis von 13 Messwerten zur Verfügung. Insgesamt scheint also ein ausreichendes Schutzniveau vorzuliegen.

Wenngleich nahezu alle BWI <1 sind, so weist der weitere Verlauf der Verteilungen für die Branchen doch deutliche Unterschiede auf. Dies deutet auf Unterschiede in der Expositionssituation und/oder im Stoffeinsatz in den betrachteten Branchen hin. Welche Faktoren für diese Unterschiede verantwortlich sind und welche Bedeutung die Unterschiede bei der probabilistischen Modellbildung haben, wird in Abschn. 8.2 näher diskutiert.

¹² Sofern Gemische zu beurteilen sind, sagen die Regeln des Control-Banding, dass der Stoff mit der höchsten Gefährlichkeit (Gefährlichkeitsgruppe) die Gefährlichkeitsgruppe des Gemischs bestimmt. Das heißt aber auch, dass ein der Gefährlichkeitsgruppe B zugehöriges Gemisch Stoffe der (nächst niedrigeren) Gefährlichkeitsgruppe A enthalten kann.

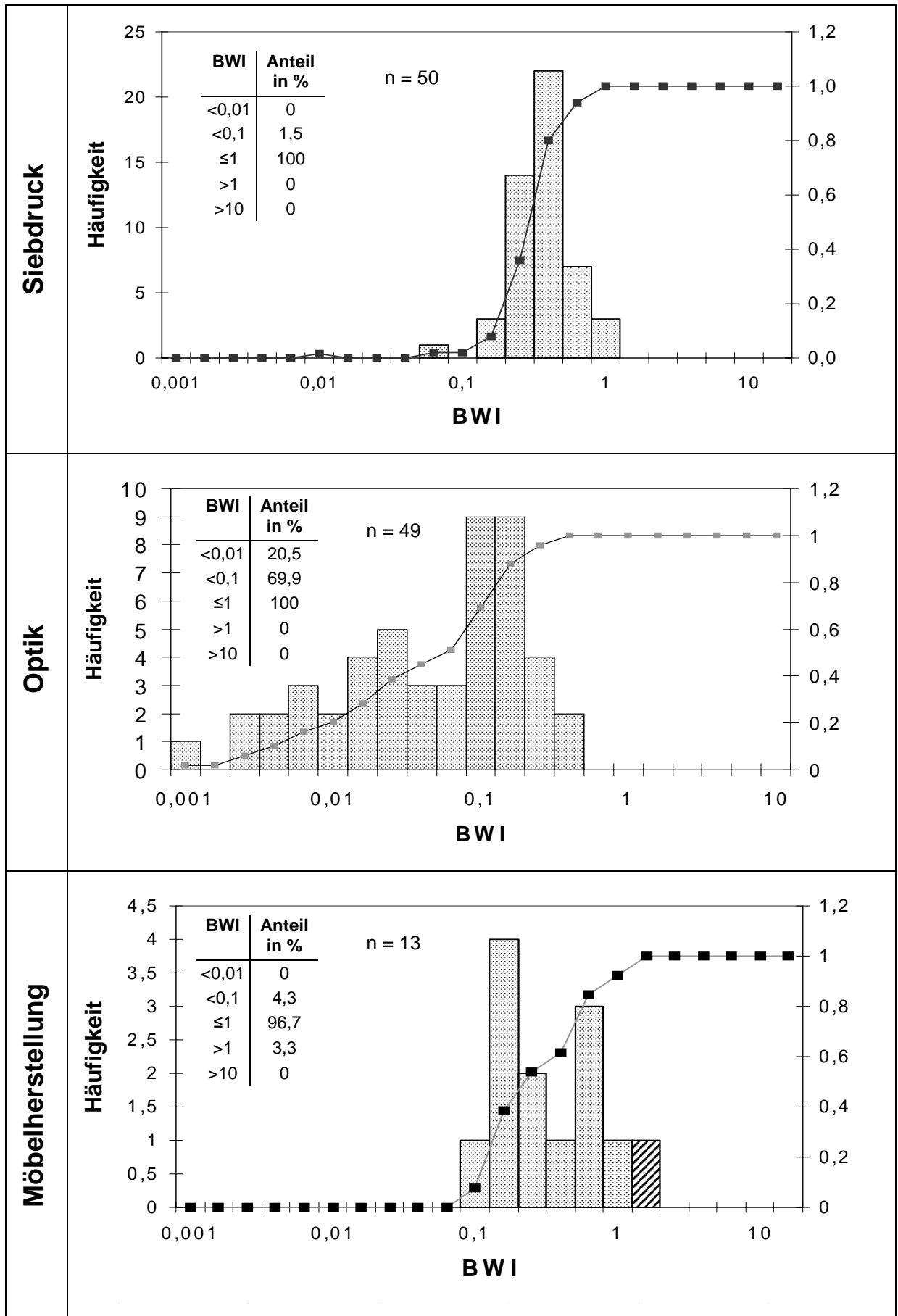


Abb. 7.2 Häufigkeitsverteilungen der BWI für das Szenario EPL2, CS1

8 Evaluierung des Schutzniveaus durch Monte-Carlo-Simulation

Während die bisherige Evaluierung des Schutzniveaus auf der Statistik diskreter Bewertungsindices basierte, wird im Folgenden untersucht, ob sich diese Statistik durch probabilistische Modellierung der Expositions- und Grenzwertverteilung und anschließende Monte-Carlo-Simulation reproduzieren lässt. Dabei werden drei Fälle unterschieden:

1) Branchenspezifische Simulation (s. Abschn. 8.1)

Für ein bestimmtes Control-Banding Szenario werden die Expositions- und Grenzwertverteilungen aus den Daten jeweils einer Branche generiert. Die Monte-Carlo-Simulation soll klären, ob und wie genau sich durch Verrechnung der empirischen Expositions- und Grenzwertverteilung, die RCR-Verteilung als Abbild der BWI-Verteilung erzeugen lässt.

2) Simulation gepoolter Branchendaten (s. Abschn. 8.2)

Für ein bestimmtes Control-Banding Szenario werden die Expositions- und Grenzwertverteilungen aus den gepoolten Daten mehrerer Branchen generiert. Die Monte-Carlo-Simulation soll klären, ob und inwieweit sich (mögliche) branchen-spezifische Unterschiede bei der Modellierung der RCR-Verteilung auswirken.

3) Generische (branchenunspezifische) Simulation (s. Abschn. 8.3)

Für ein bestimmtes Control-Banding Szenario werden die Expositions- und Grenzwertverteilungen aus branchenunspezifischen Datenquellen (Grenzwertliste TRGS 900, gepoolte Branchendaten) erzeugt. Auf diese Weise können auch Control-Banding Szenarien evaluiert werden, für die ursprünglich keine Branchendaten zur Verfügung stehen. Die erhaltenen Simulationsergebnisse stellen allerdings - ebenso wie die Eingangsverteilungen - nur eine allgemeine (generische) Aussage dar. Dieser Fall wird daher mit dem Begriff „generische Modellbildung“ umschrieben.

Während also im ersten Fall nach einzelnen Branchen differenziert wird, bleibt dieses Unterscheidungsmerkmal im dritten Fall unberücksichtigt. Insgesamt nimmt also in der Abarbeitung der Fälle 1 bis 3 die Heterogenität bzw. der generische Charakter der Daten zu, die Homogenität bzw. Vergleichbarkeit¹³ hingegen nimmt ab [31].

¹³ Zwei Expositionsszenarien sind dann miteinander vergleichbar, wenn sie sich nur in einem Einflussfaktor (z. B. Flüchtigkeit, Menge etc.) unterscheiden, aber sonst in jeder Hinsicht übereinstimmen. Vergleichbarkeit in diesem Sinne ist ein Ideal, das in der Praxis häufig nur sehr unvollkommen angenähert werden kann.

Im Folgenden wird kurz dargestellt, wie bei der Auswertung und Simulation technisch vorgegangen wurde.

Der wesentliche und kritische Schritt zur Durchführung einer Monte-Carlo-Simulation ist die Gewinnung geeigneter Verteilungsfunktionen aus den empirischen Daten. Rein rechnerisch wurden im Rahmen der Auswertung sämtliche Verteilungsanpassungen mit Hilfe des Programms @RISK durchgeführt. Wie bereits in Abschn. 5.2.1 ausgeführt, wird als Modell für die Variabilität der Expositionshöhe generell die Lognormalverteilung verwendet. Die entsprechenden Verteilungsparameter der Lognormalverteilungen wurden mit Hilfe des BestFit-Moduls von @RISK ermittelt.

Während sich die Variabilität der Expositionshöhe recht gut durch Lognormalverteilungen beschreiben lässt, folgen Grenzwertverteilungen in der Regel nicht diesem einfachen Muster. Vielmehr zeigen diese häufig einen recht unregelmäßigen Verlauf. Um die dahinter liegende Verteilung zumindest näherungsweise abzubilden, wurden daher Histogrammverteilungen für die Simulation verwendet (s. Anhang A.4).

Ein weiterer im Rahmen der Monte-Carlo-Simulation zu beachtender Punkt sind Korrelationen unter den Eingangsvariablen. Zum Beispiel lässt sich vermuten, dass hohe Grenzwerte mit hohen Expositionen korrelieren und umgekehrt. Zur Beschreibung von korrelierten Eingangsvariablen geht @RISK von dem Konzept der Rangkorrelation [20] aus. Die Stärke der Korrelation wird durch den Spearmanschen Korrelationskoeffizienten r_{SP} gemessen, der nicht die Stärke des linearen Zusammenhangs (wie der Pearsonsche Korrelationskoeffizient), sondern des monotonen¹⁴ Zusammenhangs beschreibt. Mit dem in @RISK implementierten Algorithmus können auf dieser Grundlage beliebige Verteilungstypen miteinander korreliert werden. So ist es z. B. möglich, Lognormalverteilungen mit Rechteck- oder Histogrammverteilungen zu korrelieren und auf diese Weise der jeweils gegebenen Aufgabenstellung anzupassen.

Schließlich ist bei der Durchführung einer Monte-Carlo-Simulationsrechnung die Festlegung der notwendigen Anzahl an Spielen N , um einen relativen Fehler mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit nicht zu übersteigen, zu beachten. Sie ist in der Regel,

$$\approx \sqrt{D/N} \quad (8.1)$$

wobei D eine Konstante ist [5]. Hieraus ist Folgendes zu ersehen: Will man den Fehler auf 1/10 verkleinern, so muss man N auf das 100fache erhöhen. Um den Fehler klein zu halten und wegen der Einfachheit der Modellgleichung (Gl. 5.2) (Rechenzeit ist unkritisch), wurde für die Simulation eine vergleichsweise hohe Spielanzahl von $N = 10\,000$ festgelegt.

¹⁴ $r_{SP}>0$: gleichsinniger monotoner Zusammenhang (Tendenz: wenn x groß wird, wird auch y groß bzw. wenn x klein wird, wird auch y klein);

$r_{SP}<0$: gegensinniger monotoner Zusammenhang (Tendenz: wenn x groß wird, wird y klein bzw. wenn x klein wird, wird y groß);

8.1 Ergebnisse der branchenspezifischen Simulation

Simulationsrechnungen wurden nur für das Control-Banding Szenario „Gefährlichkeitsgruppe B(+A), EPL2, CS1“, durchgeführt. Für dieses Szenario stehen Messwerte aus Siebdruckereien, Optikerwerkstätten und aus dem Bereich der Möbelherstellung zur Verfügung. Die Simulation des Szenarios „EPL3, CS1, Gefährlichkeitsgruppe A“ ist nicht sinnvoll, da hierfür ausschließlich Messwerte zu Propan-2-ol aus Offsetdruckbetrieben vorliegen – also keine Grenzwertverteilung, sondern nur ein einzelner Grenzwert.

In Abb. 8.1 sind die Ergebnisse der Auswertung bzw. Simulation gelistet. Für jede Branche sind die Histogramme bzw. Verteilungskurven der Expositionswerte, der konzentrationsgewichteten Grenzwerte (KGW), der Bewertungsindices (BWI) und der Risk Characterisation Ratio (RCR) dargestellt. Ein visueller Vergleich der BWI-Verteilung mit der modellierten RCR-Verteilung zeigt für sämtliche Branchen eine relativ gute Übereinstimmung. Quantitativ wird dies durch Tab. 8.1 bestätigt. Die Prozentanteile für ausgewählte BWI- bzw. RCR-Werte (>10 , >1 , <1 , $<0,1$, $<0,01$) unterscheiden sich in der Regel nur um wenige Prozent.

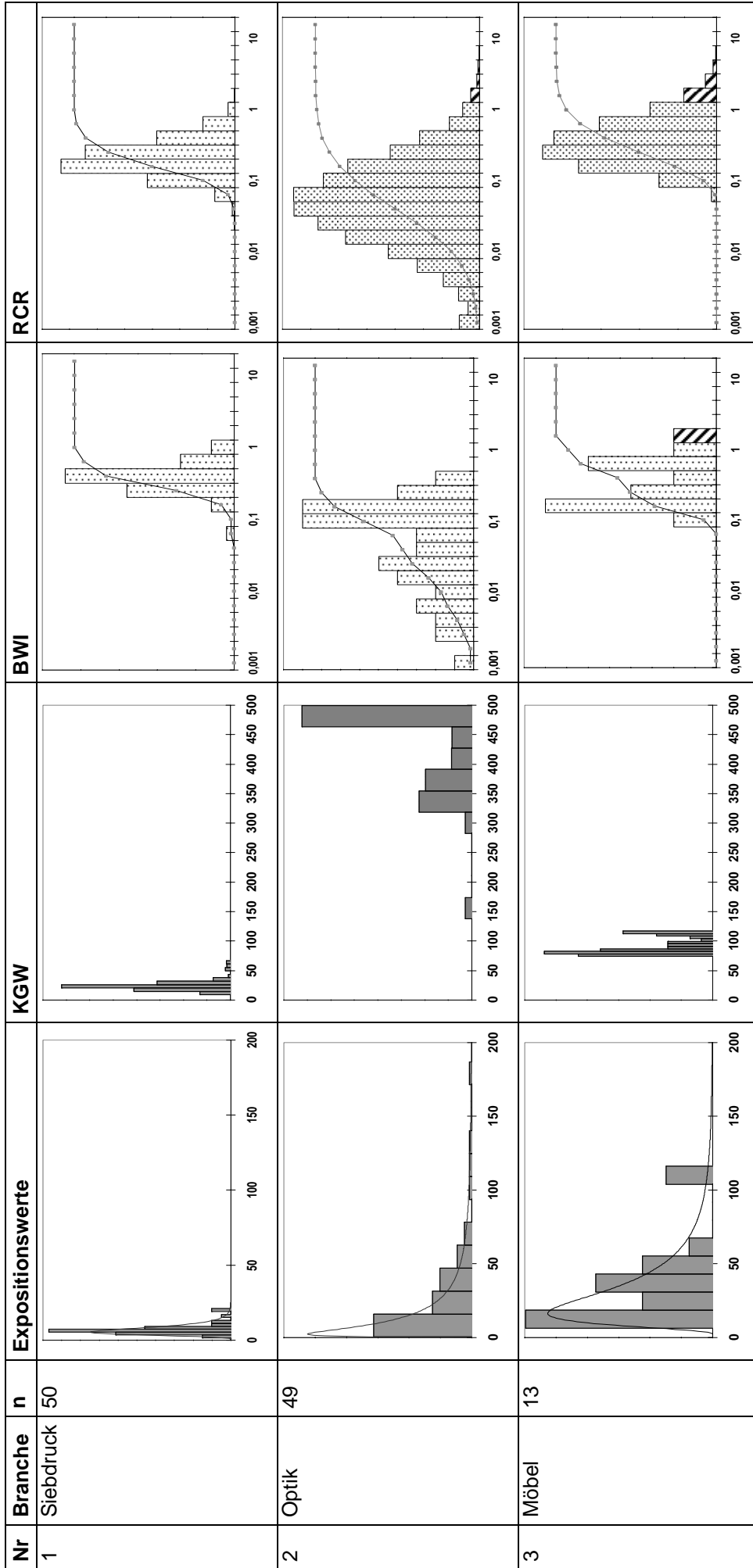


Abb. 8.1 Branchenspezifische Auswertung und Simulation für das Szenario EPL2, CS1, Gefährlichkeitsgruppe B (+A)

Tab. 8.1 Summenprozent für ausgewählte BWI- bzw. RCR-Werte

Nr.	BWI Anteil %					RCR Anteil %					r _s
	<0,01	<0,1	<1	>1	>10	<0,01	<0,1	<1	>1	>10	
1	0	1,5	100	0	0	0	2,0	99,7	0,3	0	0,29
2	20,5	69,9	100	0	0	17,2	75,7	99,0	1,0	0	-0,28
3	0	4,3	96,7	3,3	0	0	8,1	93,6	6,4	0	0,13

Zur Beurteilung von Korrelationen sind in Tab. 8.1 die entsprechenden Spearman'schen Korrelationskoeffizienten r_s gelistet. Alle Zahlenwerte liegen unterhalb 0,3 und weisen somit nur schwache Korrelationen aus. Dieses Ergebnis wird auch durch Erfahrungen untermauert, die im Rahmen von Forschungsprojekten der BAuA [22] und der HSE [23] gewonnen wurden. Danach spielen Grenzwerte in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) bei der Entscheidung über Schutzmaßnahmen kaum eine Rolle. In diesem Zusammenhang werden von den Unternehmen die Komplexität und der Umfang der gesetzlichen Regelungen beklagt. Damit einhergeht, dass tägliche Verwender von Chemikalien in KMU nur sehr begrenzte Kenntnisse in Bezug auf Gefahrstoffe haben. Die Auswahl von Schutzmaßnahmen orientiert sich daher eher an branchentypischen Vorgehensweisen (z. B. abgesaugte Druckmaschinen). Eine Wirksamkeitsprüfung der eingesetzten Schutzmaßnahmen auf der Grundlage von Arbeitsplatzmessungen findet nur sehr begrenzt statt, denn nur in etwa 1 – 2 % der gewerblichen Betriebe werden Arbeitsplatzmessungen durchgeführt.

8.2 Simulationsergebnisse auf der Grundlage gepoolter Branchendaten

Aus theoretischer Sicht vereinfachen sich die Dinge, wenn die Vorgaben des Control-Banding (Expositionspotential, Maßnahmenpakete) dazu führten, dass die Expositionssituation an allen Arbeitsplätzen und in allen Branchen die gleiche Variabilität aufweist. Für ein bestimmtes Control-Banding Szenario wäre dann – unabhängig von der Branche – die Wahrscheinlichkeit und Verteilung der Exposition für jeden Arbeitnehmer gleich. In diesem Fall können die Branchendaten (als Stichprobe einer homogenen Grundgesamtheit) gepoolt werden. Auf der Grundlage der gepoolten Daten ist dann eine Gesamtaussage zum Schutzniveau eines bestimmten Control-Banding Szenarios möglich.

Dabei ist es nicht erforderlich, dass auch die Grenzwertverteilung auf eine homogene Grundgesamtheit zurückgeht. Vielmehr kann die Grundgesamtheit aus verschiedenen Untergruppen (z. B. Arbeitsplätzen, Betrieben) bestehen, die verschiedene Grenzwertverteilungen aufweisen. Voraussetzung ist allerdings, dass Exposition und Grenzwert nicht korreliert sind. In diesem Fall lässt sich die Gesamtgrenzwertverteilung mathematisch als Summe (Mischverteilung) der Verteilungen der Untergruppen formulieren (s. Anhang A.2). Dabei ist die Summenbildung gleichbedeutend mit dem „Poolen“ von Daten.

Liegen allerdings Korrelationen vor, lässt sich das „Poolen“ von Daten nicht mehr durch eine einfache Summenbildung beschreiben, sondern ist mathematisch recht

komplex. In welcher Weise das „Poolen“ von korrelierten Daten bei der Modellbildung berücksichtigt werden muss, wurde nicht näher untersucht. Hier besteht ggf. weiterer Forschungsbedarf. Grundsätzlich gilt aber, dass schwache Korrelationen auch die Simulationsergebnisse nur wenig beeinflussen (s. Anhang A.3).

Welchen Einfluss das „Poolen“ von Branchendaten auf die Simulationsergebnisse hat, ist Abb. 8.2 zu entnehmen. Dargestellt sind in der ersten Zeile die Histogramme zu den gepoolten Daten aus dem Bereich der Optik und der Möbelherstellung. Ein visueller Vergleich der BWI-Verteilung mit der modellierten RCR-Verteilung zeigt eine relativ gute Übereinstimmung. Quantitativ wird dies durch Tab. 8.2, Nr.1 bestätigt. Die Prozentanteile für ausgewählte BWI- bzw. RCR-Werte (>10, >1, <1, <0,1, <0,01) unterscheiden sich in der Regel nur um einige Prozent.

Erklären lässt sich dieses Ergebnis durch die Ähnlichkeit der Expositionsverteilungen für den Bereich der Optik und der Möbelherstellung (s. Abb. 8.1, Nr. 2 und 3). Dagegen sind die Grenzwertverteilungen recht unterschiedlich. Aufgrund der oben beschriebenen mathematischen Zusammenhänge wirkt sich dies aber nicht entscheidend auf die Genauigkeit der Simulationsergebnisse aus.

Ein merklich anderes Bild zeigt die zweite Zeile. Die dargestellten Histogramme repräsentieren die über alle drei Branchen gepoolten Daten. Ein visueller Vergleich der BWI-Verteilung mit der modellierten RCR-Verteilung zeigt merkliche Abweichungen. Die Prozentanteile für ausgewählte BWI- bzw. RCR-Werte (>10, >1, <1, <0,1, <0,01) unterscheiden sich zum Teil im zweistelligen Bereich (s. Tab. 8.2, Nr. 2).

Tab. 8.2 Prozentanteile für ausgewählte BWI- bzw. RCR-Werte (gepoolte Daten)

Nr.	BWI Anteil %					RCR Anteil %					r _s
	<0,01	<0,1	<1	>1	>10	<0,01	<0,1	<1	>1	>10	
1	9,7	65,5	99,1	0,9	0	15,1	57,7	99,3	0,7	0	0,262831
2	8,8	32,0	99,6	0,4	0	5,0	45,0	87,1	12,9	1	0,322722

Erklären lassen sich diese Abweichungen durch Unterschiede in der Expositionssituation in den betrachteten Branchen. Ein Vergleich der in der Spalte „Expositionsmesswerte“ gelisteten Histogramme bzw. Verteilungskurven (s. Abb. 8.1) zeigt, dass sich die Siebdruckbranchen von den beiden anderen Branchen deutlich unterscheiden. Die Verschiebung zu niedrigen Expositionswerten ist im Wesentlichen auf Unterschiede im Expositionspotenzial zurückzuführen.

Während in Siebdruckereien Lösemittel geringer Flüchtigkeit (Kp. >150 °C) in Litermengen (Druckfarben, Reinigungsmittel) gehandhabt werden, kommen in Optikerwerkstätten (Reinigen von Brillen) und bei der Möbelherstellung (z. B. Auftragen von Klebstoffen) oftmals Millilitermengen hochflüchtiger Lösemittel zur Anwendung¹⁵. Offensichtlich wird die Exposition durch die Flüchtigkeit stärker bestimmt als durch die Menge.

¹⁵ Gleichwohl werden sämtliche Lösemittel nach den Maßgaben des Control-Banding der Freisetzungsguppe EPL2 zugeordnet (s. Anhang B, Tab. B.2.3).

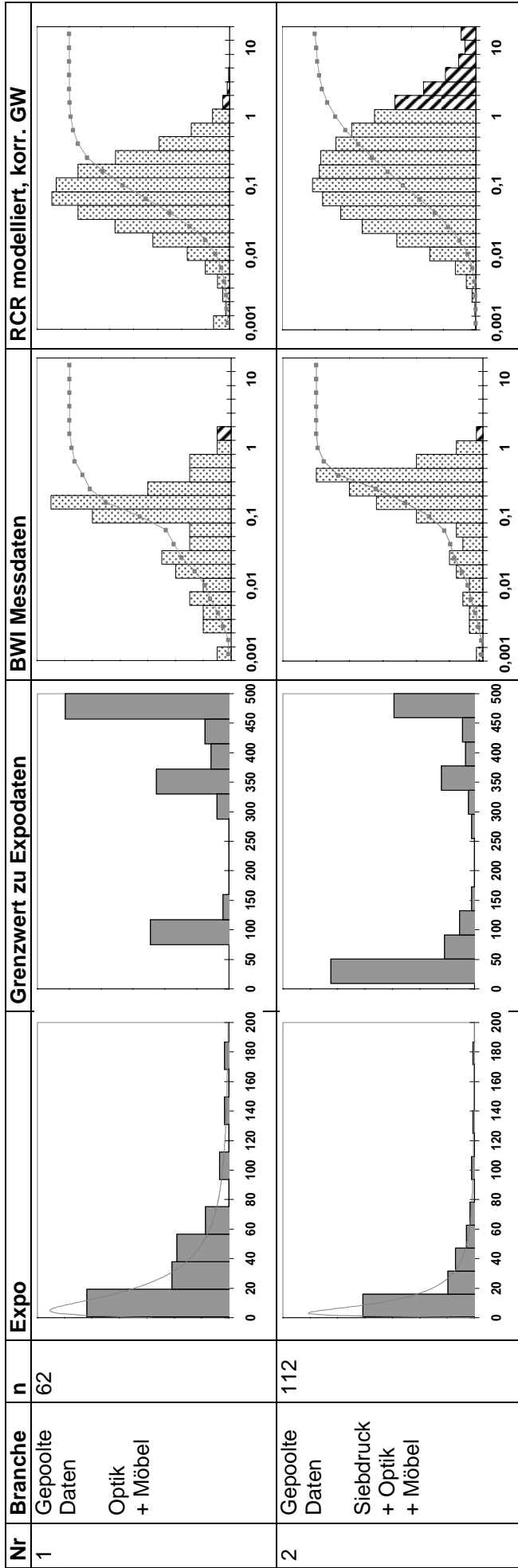


Abb. 8.2 Auswertung und Simulation für das Szenario EPL2, CS1, Gefährlichkeitsgruppe B(+A) auf Basis gepoolter Branchendaten

Wenngleich die Expositionen in Siebdruckbetrieben auf einem niedrigeren Niveau liegen als in den beiden anderen Branchen, führen die gleichzeitig niedrigen Grenzwerte dazu, dass der Anteil der RCR-Werte >1 in den über alle Branchen gepoolten Daten (Tab. 8.2, Nr. 2) dramatisch höher liegt als in den über die Möbel- und Optikbranche gepoolten Daten (0,7 vs. 12,9 %). Werden also heterogene Datenkollektive, die unterschiedlichen Expositionssituationen entstammen, gepoolt, ist nicht ohne weiteres zu erwarten, dass das probabilistische Modell die BWI-Verteilung wieder repliziert. Vielmehr beschreibt das Modell durch Verrechnung der korrespondierenden Verteilungen (z. B. die Expositionsverteilung im Bereich der Optik mit der Grenzwertverteilung in der Siebdruckbranche) auch (Misch-)Situationen, die im Rahmen der BAuA-Branchenprojekte so in den Betrieben nicht angetroffen wurden. Gleichwohl sind diese Situationen nach den Vorgaben des Control-Banding Szenarios (Gefährlichkeitsgruppe B, EPL2, CS1) zulässig und im Prinzip auch realisierbar. Im Ergebnis führt also das Poolen heterogener Datenkollektive zu umfassenderen generischen Modellaussagen, die nicht den Anspruch haben, Arbeitsplatzsituationen konkret zu beschreiben, sondern eher der Möglichkeit nach zu charakterisieren.

Die Ergebnisse des folgenden Abschnittes zeigen, dass eine generische Modellierung gleichwohl erste Hinweise auf das erreichbare Schutzniveau geben kann.

8.3 Ergebnisse der generischen Simulation

Die bisher vorgestellten Ergebnisse beruhen sämtlich auf betriebs- bzw. branchenbezogenen Daten, die einem bestimmten Control-Banding Szenario zugeordnet werden können. Allerdings konnten insbesondere aufgrund des Merkmals „Gefährlichkeitsgruppe“ nur für zwei Control-Banding Szenarien entsprechende Mess- und Grenzwerte gefunden werden. Gibt man die Forderung nach übereinstimmender „Gefährlichkeitsgruppe“ auf, stehen deutlich mehr Expositionsdaten für eine Simulationsrechnung zur Verfügung. Tabelle 8.3 enthält die berücksichtigten Datenquellen, die Anzahl der Messpunkte (n) für die jeweilige Kombination aus Expositionspotenzial und Maßnahmenpaket sowie die Gefährlichkeitsgruppe, die hierdurch adressiert wird.

Tab. 8.3 Datenquellen für die generische Modellbildung (Exposition)

Nr.	Expositionspotenzial/ Maßnahmenpaket	Datenquelle	n	Adressierte Gefährlichkeitsgruppe
1	EPL3-CS1	Möbelherstellung	16	A
		Textilindustrie	50	
		Offsetdruck	218	
		Siebdruck	72	
2	EPL2-CS1	Optikbranche	13	B
		Möbelherstellung	13	
		Siebdruck	46	
		Klebearbeiten	6	
3	EPL3-CS2	Farbenherstellung	20	B
4	EPL3-CS3	Chemische Industrie	158	C
5	EPS3-CS2	Chemische Industrie	64	B
		Textilindustrie	14	

Für die generische Modellbildung bzw. die Verteilungsanpassung werden alle in Tab. 8.3 gelisteten Datenquellen herangezogen und für eine bestimmte Kombination aus Expositionspotenzial und Maßnahmenpaket gepoolt. Zum Beispiel erfolgt die Verteilungsanpassung für die Kombination EPL3-CS1 auf der Grundlage der über die Möbelherstellung, die Textilindustrie, den Offsetdruck und den Siebdruck gepoolten Daten. Das statistische Gewicht der einzelnen Datenkollektive wird ausschließlich durch die Anzahl der Messpunkte bestimmt. Eine zusätzliche Wichtung, z. B. aufgrund von Hintergrundinformationen zur Größe einzelner Branchen, wurde nicht vorgenommen. Die Histogramme zu den gepoolten Daten sowie die Ergebnisse der Verteilungsanpassung sind in Abb. 8.3 in der Spalte Expositionsdaten gelistet.

Während expositionsseitig gepoolte Branchendaten Grundlage der generischen Modellbildung sind, wird zur Modellierung der Gefährlichkeitsgruppe auf die in der TRGS 900 gelisteten Grenzwerte zurückgegriffen. Die zu den einzelnen Gefährlichkeitsgruppen korrespondierenden Histogramme finden sich in Abb. 8.3. In der Simulation wird wieder die Hüllkurve der Histogramme als Verteilungsfunktion verwendet.

Es ist anzumerken, dass die in der TRGS 900 tabellierten Grenzwerte und die damit korrespondierenden Verteilungen natürlich nicht die technologischen Gegebenheiten in den einzelnen Branchen bzw. die Einsatzhäufigkeiten von Stoffen reflektieren, sondern die Bedingungen, die zur Aufstellung von Luftgrenzwerten führen. Es geht somit der Bezug zu den Branchen verloren. Auch werden Stoffe betrachtet, die in den Branchen nicht verwendet werden. Insgesamt wird also das Stoffspektrum erwei-

tert, gleichzeitig nehmen die Breite und der generische Charakter der Verteilungen zu.

Abb. 8.3 enthält in der Spalte RCR die aus der Monte-Carlo-Simulation resultierenden Histogramme. Rein visuell fallen die drei ersten Histogramme durch einen vergleichsweise deutlichen Anteil von RCR >1 auf. Tabelle 8.4 belegt diesen Eindruck quantitativ. Offensichtlich können bei der Handhabung von Flüssigkeiten (EPL3, EPL2) der Gefährlichkeitsgruppe A bzw. B bei natürlicher Lüftung (CS1) bzw. in Gegenwart einer lokalen Absaugung (CS2) auch bei Einhaltung der Control-Banding Vorgaben potenziell Situationen auftreten, die im kritischen Bereich liegen. Mit welcher Häufigkeit derartige Situationen an realen Arbeitsplätzen auftreten ist allerdings aufgrund des generischen Charakters der Eingangsverteilungen nur schwer beurteilbar.

Tab. 8.4 Prozentanteile für ausgewählte RCR-Werte (generische Simulation)

Nr.	Szenario	RCR						
		Anteil %						
		<0,001	<0,01	<0,1	<1	>1	>10	>100
1	EPL3-CS1	0,0	1,1	22,0	74,0	26,0	2,8	0,3
2	EPL2-CS1	0,0	1,1	16,6	68,4	31,6	4,1	0,5
3	EPL3-CS2	0,4	4,9	33,0	78,7	21,3	2,9	0,3
4	EPL3-CS3	55,8	88,2	97,8	99,7	0,3	0,1	0,1
5	EPS3-CS2	1,1	21,7	66,5	93,2	6,8	1,0	0,2

Ein deutlich anderes Bild ergibt sich, wenn Flüssigkeiten (EPL3) der Gefährlichkeitsgruppe C in geschlossenen Anlagen (CS3) gehandhabt werden. Der Anteil RCR >1 liegt hier bei 0,3 %. Hier ist der Überlappingsgrad zwischen der Exposition- und Grenzwertverteilung so gering, dass potenziell nur eine geringe Wahrscheinlichkeit für das Auftreten kritischer Arbeitsplatzsituationen zu vermuten ist.

Ähnliche Ergebnisse liefert die Simulation für die Handhabung von Feststoffen (EPS3) der Gefährlichkeitsgruppe B unter lokaler Absaugung (CS2). In diesem Fall liegt der Anteil RCR >1 bei 6,8 %.

Grundsätzlich muss bei der Interpretation der Ergebnisse bewusst sein, dass eine generische Modellierung nicht den Anspruch haben kann, konkrete Situationen abzubilden, sondern eher potenziell mögliche Situationen am Arbeitsplatz beschreibt. Das heißt, die Modellierung gibt nur sehr begrenzt Auskunft über die realen Auftrittswahrscheinlichkeiten. Die Aussage wird allerdings eindeutiger, wenn der Überlappingsgrad zwischen der Expositions- und Grenzwertverteilung gering ist (wie in den Beispielen Nr. 3 und 5). In diesen Fällen wird aufgrund des Abstandes von Expositions- und Grenzwertverteilungen selbst das Auftreten kritischer, aber potenziell

möglicher Arbeitsplatzsituationen eher unwahrscheinlich. Das heißt, es ist ein vergleichsweise hohes Schutzniveau zu erwarten.

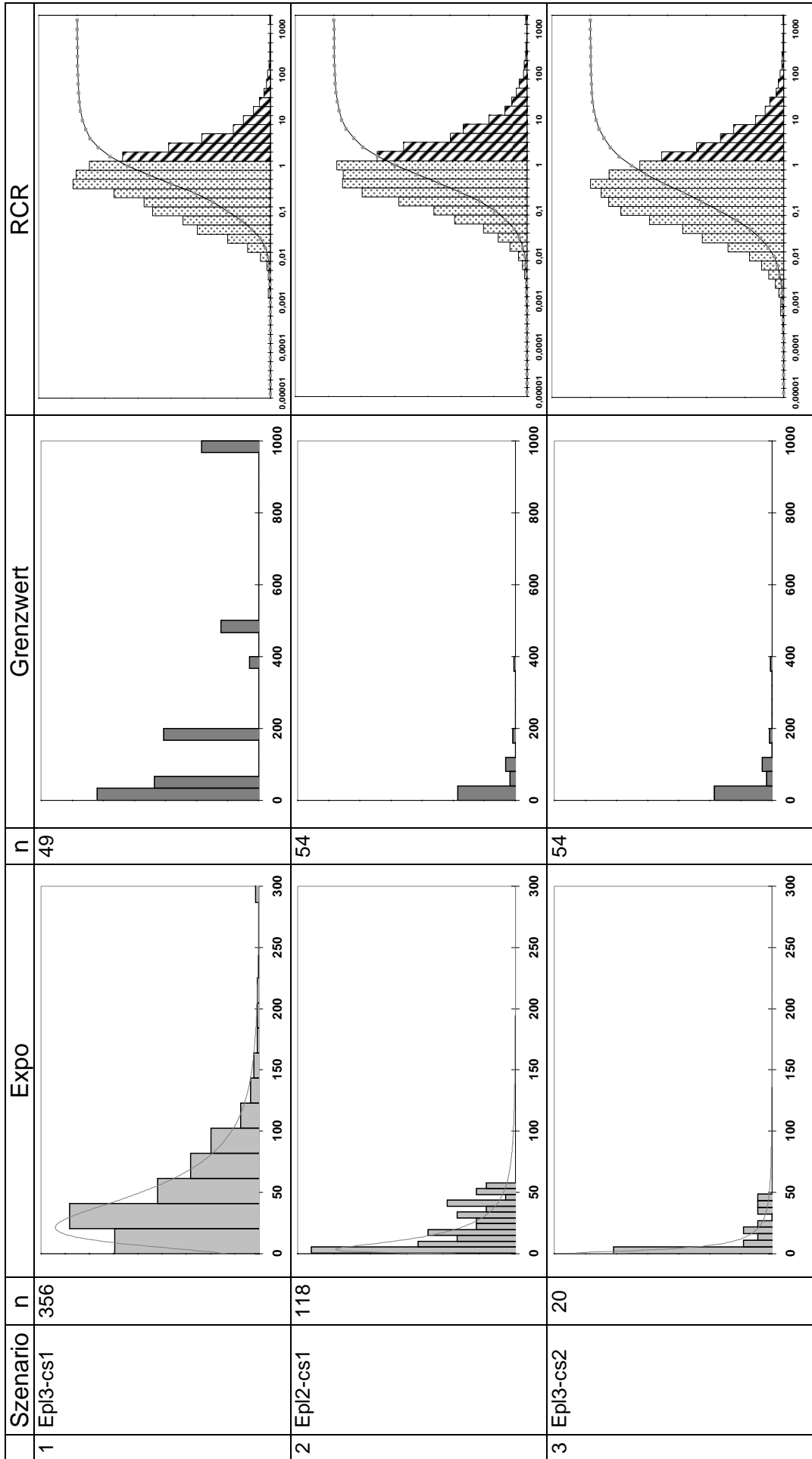


Abb. 8.3 Ergebnisse der generischen Auswertung und Simulation

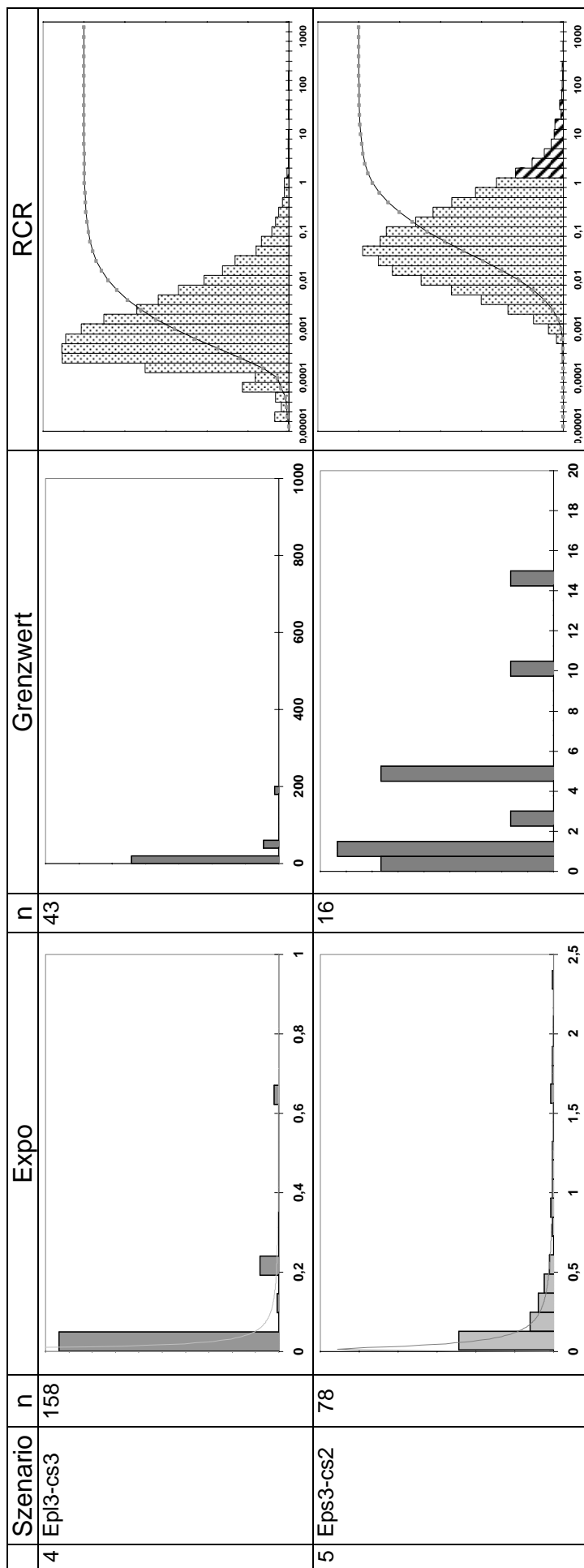


Abb. 8.3 Fortsetzung - Ergebnisse der generischen Auswertung und Simulation

9 Zusammenfassung

Mit der Entwicklung des Einfachen Maßnahmenkonzeptes Gefahrstoffe (EMKG) hat die BAuA erstmals einen Modellansatz verfolgt, der auf der Idee des „Control-Banding“ basiert. Beim Control-Banding handelt es sich um einen kategorisierenden Ansatz, der für Gefahrstoffe ohne Arbeitsplatzgrenzwert die gefährlichen Eigenschaften (Einstufung, R-Sätze) gruppiert und diese Gefährlichkeitsgruppen hilfsweise mit anzustrebenden Luftkonzentrationsbereichen in der Atemluft verknüpft. An die Stelle der Gefahrstoffmessung tritt eine modellmäßige Abschätzung der Belastung, die lediglich die Menge, das Freisetzungspotenzial und die anzuwendenden Schutzmaßnahmen berücksichtigt. Die Schutzmaßnahmen werden so vorgeschlagen, dass die abgeschätzte Belastung inner- oder unterhalb der anzustrebenden Luftkonzentrationsbereiche liegt.

Ob die Control-Banding Vorgaben des EMKG in der Praxis tatsächlich zu einem ausreichenden Schutz von Arbeitnehmern führen können, ist in der Vergangenheit jeweils für die Wirkungs- und die Belastungsseite getrennt untersucht worden. Auf der Wirkungsseite wurden hierzu für Stoffe mit bekanntem AGW die Grenzwertverteilungen separat für jede Gefährlichkeitsgruppe ermittelt. Belastungsseitig erfolgte die Evaluierung anhand von Häufigkeitsverteilungen, die auf der Basis bereits vorhandener Expositionsmessdaten berechnet wurden. Diese getrennte Vorgehensweise hat allerdings den Nachteil, dass Aussagen zum Schutzniveau jeweils auf den Blickwinkel der einen oder anderen Seite verengt werden. Das heißt, je nach Sichtweise können sich unterschiedliche Aussagen zum Schutzniveau ergeben, die nur schwierig zu interpretieren sind.

In dieser Arbeit wird daher ein integriertes Evaluierungsverfahren vorgeschlagen, das versucht, durch Zusammenführung der Wirkungs- und Belastungsseite eine möglichst realistische Gesamtaussage zum Schutzniveau zu erzielen. Ausgangspunkt hierfür ist die Bildung des sog. Bewertungsindex (BWI), der den Quotienten aus Exposition und Grenzwert darstellt. Mit Hilfe dieses Quotienten kann das Risiko an einem konkreten Arbeitsplatz durch eine einzige quantitative Größe charakterisiert werden.

Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Verhältnisse an Arbeitsplätzen im Hinblick auf Stoffeinsatz und Exposition nicht konstant, sondern variabel sind. Will man diese Variabilität an Arbeitsplätzen abbilden, sind wiederholte Messungen unter wechselnden Bedingungen erforderlich. Erst die hiermit korrespondierenden Häufigkeitsverteilungen der BWI und deren statistische Kennwerte (Perzentile etc.) erlauben Rückschlüsse auf das erreichte Schutzniveau.

Als Datengrundlage für die Berechnung der BWI-Häufigkeitsverteilungen stehen im Wesentlichen die Ergebnisse von Branchenprojekten der BAuA aus den letzten 15 Jahren zur Verfügung. Insgesamt konnte auf 732 Messpunkte für flüssige Stoffe (überwiegend organische Lösemittel) zurückgegriffen werden. Nahezu alle gemessenen Stoffe haben Grenzwerte, die in der TRGS 900 gelistet sind. Datenpunkte für Feststoffe standen nicht zur Verfügung, da diese i. d. R. nicht stoffspezifisch analysiert wurden.

Welche Daten aus dem zur Verfügung stehenden Messdatenpool in die Evaluierung einfließen können, wird anhand der Kriterien des Control-Banding entschieden. Danach werden 3 Merkmale benötigt, um eine Arbeitsplatzsituation zu beschreiben:

- **Gefährlichkeitsgruppe** (A, B, C, D)
- **Freisetzungspotential** (EPL für Flüssigkeiten, EPS für Feststoffe)
- **Maßnahmenpaket** (CS)

Eine solche Kombination aus Gefährlichkeitsgruppe, Freisetzungspotenzial und Maßnahmenpaket wird als „Control-Banding Szenario“ bezeichnet. Messpunkte werden im Rahmen der Evaluierung nur dann berücksichtigt, wenn sie einem Control-Banding Szenario zugeordnet werden können. Diese Bedingung wird aber nur von einem Teil der empirischen Daten erfüllt, so dass im Ergebnis nur für zwei Control-Banding Szenarien geeignete Messpunkte (n = 332) gefunden werden konnten:

Gefährlichkeitsgruppe A, EPL3, CS1

Für dieses Control-Banding Szenario liegen ausschließlich Messwerte (n = 220) zu Propan-2-ol aus Offsetdruckbetrieben vor. Bei Propan-2-ol handelt es sich um einen mittelflüchtigen Stoff (Sdp. 82 °C), der in Litermengen gehandhabt wird. Dies führt zu dem Freisetzungspotenzial EPL3, das in Verbindung mit der Gefährlichkeitsgruppe A das Maßnahmenpaket CS1 (Lüftung) erfordert.

Der in der TRGS 900 gelistete AGW für Propan-2-ol liegt bei 200 ppm. Es liegt also keine Grenzwertverteilung vor, sondern nur ein diskreter Grenzwert. Die Berechnung der entsprechenden Bewertungsindices und die Einsortierung in Häufigkeitsklassen weist nur sehr wenige Grenzwertüberschreitungen aus. Nur etwa 0,4 % der BWI sind >1. Insgesamt deutet die Häufigkeitsverteilung der BWI auf ein ausreichendes Schutzniveau hin.

Gefährlichkeitsgruppe B, EPL2, CS1

Für dieses Szenario stehen Expositionsdaten zum Einsatz von Lösemitteln in Siebdruckbetrieben (n = 50), Optikerwerkstätten (n = 49) und im Bereich der Möbelherstellung (n = 13) zur Verfügung. Die für jede Branche separat berechneten Häufigkeitsverteilungen der BWI weisen lediglich für den Bereich der Möbelherstellung 1 Grenzwertüberschreitung aus. Für diese Branche steht jedoch nur eine sehr schmale Datenbasis von 13 Messwerten zur Verfügung. In Siebdruckereien und Optikerwerkstätten wurden keine BWI >1 festgestellt. Insgesamt scheint also ein ausreichendes Schutzniveau vorzuliegen.

Aufgrund des großen materiellen und personellen Aufwandes, den messtechnische Erhebungen erfordern, ist eine flächendeckende Evaluierung aller möglichen Control-Banding Szenarien in der Praxis kaum leistbar. Es stellt sich daher die Frage, ob wirklich jede im Rahmen des Control-Bandings zulässige Arbeitsplatzsituation messtechnisch erfasst werden muss oder ob nicht auch durch Modellbetrachtungen verallgemeinernde (generische) Aussagen zum erreichten bzw. erreichbaren Schutzniveau möglich sind. Einen methodischen Zugang zur Bearbeitung dieser Fragestellung bietet die Wahrscheinlichkeitstheorie (Probabilistik) mit ihren Verfahren

zur probabilistischen Modellbildung. Als Modellinput dienen die gefitteten Häufigkeitsverteilungen der Arbeitsplatzgrenzwerte und Messwerte. Es sind also drei Verteilungen im Spiel: die Messwertverteilung, die Grenzwertverteilung und die BWI-Verteilung. Im Rahmen der Modellbildung wird gefragt, ob bzw. auf welche Weise sich ein Modell der BWI-Verteilung aus den beiden anderen Verteilungen konstruieren lässt. Die so modellierte Verteilung wird als RCR-Verteilung bezeichnet.

Rein rechnerisch wird die RCR-Verteilung mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation ermittelt. Dieses Verfahren basiert auf der Durchführung wiederholter Simulationsläufe mit je unterschiedlichen Realisierungen der Eingangsparameter, welche von den empirischen Verteilungsfunktionen gezogen werden. Wird die Ziehung häufig wiederholt, erhält man im Ergebnis eine Häufigkeitsverteilung der RCR, die Rückschlüsse auf das jeweilige Schutzniveau erlaubt. Dabei werden die relativen Häufigkeiten als Wahrscheinlichkeiten interpretiert. Das heißt im Ergebnis: aus *Erfahrung* wird *Erwartung*.

Ob und unter welchen Bedingungen die Monte-Carlo-Simulation ein getreues Abbild der BWI-Verteilung erzeugt, welchen Einfluss Korrelationen der Eingangsparameter haben und unter welchen Bedingungen sich die Simulationsergebnisse verallgemeinern lassen, wurde für folgende Fälle untersucht. Dabei nimmt der generische Charakter bzw. die Heterogenität der Daten von Fall 1 bis Fall 3 zu, die Vergleichbarkeit bzw. Homogenität hingegen nimmt ab.

- 1) *Die Expositions- und Grenzwertverteilungen werden aus den Daten jeweils einer Branche generiert.*

Dieser Fall konnte nur für das Control-Banding Szenario „Gefährlichkeitsgruppe B, EPL2, CS1“ durchgerechnet werden, da nur für dieses Szenario Messdaten aus verschiedenen Branchen zur Verfügung stehen. Die Simulationsrechnung, mit anschließendem visuellem Vergleich der BWI-Verteilung mit der modellierten RCR-Verteilung, zeigt für sämtliche Branchen eine relativ gute Übereinstimmung. Quantitativ wird dies durch die Summenprozentage für ausgewählte BWI- bzw. RCR-Werte (>10 , >1 , <1 , $<0,1$, $<0,01$) unterstrichen, sie unterscheiden sich in der Regel nur um wenige Prozent.

Grundsätzlich können Korrelationen der Eingangsparameter das Simulationsergebnis beeinflussen. Eine entsprechende Korrelationsanalyse zeigt aber, dass Messwerte und Grenzwerte nur schwach korreliert sind. Die Spearman'schen Korrelationskoeffizienten liegen sämtlich unterhalb 0,3. Offensichtlich beeinflussen schwache Korrelationen das Ergebnis der Simulation nur gering. Dies wird auch durch die mathematische Analyse der Modellgleichung bestätigt.

- 2) *Die Expositions- und Grenzwertverteilungen werden aus den gepoolten Daten mehrerer Branchen generiert.*

Werden die Daten über alle drei Branchen gepoolt, weist der Vergleich der BWI-Verteilung mit der modellierten RCR-Verteilung merkliche Abweichungen aus. Die

Summenprozent für ausgewählte BWI- bzw. RCR-Werte (>10 , >1 , <1 , $<0,1$, $<0,01$) unterscheiden sich zum Teil im zweistelligen Bereich. Werden also heterogene Datenkollektive, die unterschiedlichen Expositionssituationen entstammen, gepoolt, ist nicht ohne weiteres zu erwarten, dass das probabilistische Modell die BWI-Verteilung wieder repliziert. Vielmehr beschreibt das Modell durch Verrechnung der korrespondierenden Verteilungen (z. B. die Expositionsverteilung im Bereich der Optik mit der Grenzwertverteilung in der Siebdruckbranche) auch (Misch-)Situationen, die im Rahmen der BAuA-Branchenprojekte so in den Betrieben nicht angetroffen wurden. Gleichwohl sind diese Situationen nach den Vorgaben des Control-Banding Szenarios (Gefährlichkeitsgruppe B, EPL2, CS1) zulässig und im Prinzip auch realisierbar.

Ein anderes Bild ergibt das Poolen von Daten aus dem Bereich der Optikerwerkstätten und der Möbelherstellung. Während die Expositionsverteilungen für beide Bereiche recht ähnlich sind, zeigen die Grenzwertverteilungen deutliche Unterschiede. Gleichwohl zeigt ein visueller Vergleich der BWI-Verteilung mit der modellierten RCR-Verteilung eine relativ gute Übereinstimmung. Quantitativ wird dies durch die Summenprozent für ausgewählte BWI- bzw. RCR-Werte (>10 , >1 , <1 , $<0,1$, $<0,01$) bestätigt. Diese unterscheiden sich in der Regel nur um einige Prozent.

Dieses Ergebnis wird durch die mathematische Beschreibung des probabilistischen Modells vorhergesagt. Danach sind bei einer homogenen Messwertverteilung auch dann gute Modellierungsergebnisse zu erwarten, wenn die Grenzwertverteilung auf eine heterogene Grundgesamtheit zurückgeht. Voraussetzung ist, dass Exposition und Grenzwert nicht korreliert sind.

3) *Die Expositions- und Grenzwertverteilungen werden aus branchenunspezifischen Datenquellen (Grenzwertliste TRGS 900, gepoolte Branchendaten) erzeugt.*

Auf der Grundlage des vorhandenen Datenmaterials lässt sich für insgesamt fünf Control-Banding Szenarien eine Simulation durchführen. Aufgrund der heterogen zusammengesetzten, breiten Datenbasis wird die Bezeichnung „generische Simulation“ verwendet. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass bei der Handhabung von Flüssigkeiten (EPL3, EPL2) der Gefährlichkeitsgruppe A bzw. B bei natürlicher Lüftung (CS1) bzw. in Gegenwart einer lokalen Absaugung (CS2) auch bei Einhaltung der Control-Banding Vorgaben potenziell Situationen auftreten, die im kritischen Bereich liegen (Anteil RCR >1 zwischen 21 und 32 %). Mit welcher Häufigkeit derartige Situationen an realen Arbeitsplätzen auftreten können, ist allerdings aufgrund des generischen Charakters der Eingangverteilungen nur schwer beurteilbar.

Ein deutlich anderes Bild ergibt sich, wenn Flüssigkeiten (EPL3) der Gefährlichkeitsgruppe C in geschlossenen Anlagen (CS3) gehandhabt werden. Der Anteil $RCR > 1$ liegt hier bei 0,3 %. Hier ist der Überlappungsgrad zwischen der Exposition- und Grenzwertverteilung so gering, dass potenziell nur eine geringe Wahrscheinlichkeit für das Auftreten kritischer Arbeitsplatzsituationen zu vermuten ist.

Ähnliche Ergebnisse liefert die Simulation für die Handhabung von Feststoffen (EPS3) der Gefährlichkeitsgruppe B unter lokaler Absaugung (CS2). In diesem Fall liegt der Anteil $RCR > 1$ bei 6,8 %, so dass auch hier ein ausreichendes Schutzniveau vermutet werden kann.

In der Gesamtschau zeigen die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation, dass mit Hilfe eines probabilistischen Modells das empirisch ermittelte Schutzniveau mit hinreichender Genauigkeit abgebildet werden kann, wenn eine homogene Messwertverteilung vorliegt. Werden dagegen heterogene Datenkollektive, die unterschiedlichen Expositionssituationen entstammen, gepoolt, ist nicht ohne weiteres zu erwarten, dass das probabilistische Modell die BWI-Verteilung wieder reproduziert.

Vielmehr beschreibt das Modell durch Verrechnung der korrespondierenden Verteilungen auch (Misch-)Situationen, die im Rahmen der BAuA-Branchenprojekte so in den Betrieben nicht angetroffen wurden. Das heißt, die Monte-Carlo-Simulation deckt einen größeren Variationsbereich ab, der den Simulationsergebnissen einen eher generischen, unspezifischen Charakter verleiht.

Gleichwohl sind die o. g. Arbeitsplatzsituationen im Rahmen der Control-Banding Vorgaben zulässig und können zumindest der Möglichkeit nach in der Praxis auftreten. Weist daher die generische Simulation einen relevanten Anteil von $RCR > 1$ aus, betont dies die Notwendigkeit weitere spezifische Arbeitsplatzsituationen messtechnisch zu evaluieren. Erst durch die messtechnische Evaluierung können die bestehenden Unsicherheiten der generischen Simulation ggf. beseitigt werden.

Gleichwohl können auch die Ergebnisse der generischen Simulation als wichtige Hinweise auf das erreichbare Schutzniveau interpretiert werden. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Grenzwertverteilung rechts von der Messverteilung liegt und der Überlappungsgrad der Verteilungen gering ist. Diese Situation wurde z. T. bei der Handhabung von Flüssigkeiten in geschlossenen Systemen und bei der Handhabung von Feststoffen unter lokaler Absaugung angetroffen. Allerdings bewegt sich auch hier die Interpretation der Ergebnisse immer in dem Spannungsfeld „generisch vs. spezifisch“, so dass grundsätzlich keine absoluten Aussagen zu erwarten sind, sondern mehr oder weniger belastbare Wahrscheinlichkeitsaussagen.

10 Literatur

- [1] Einfaches Maßnahmenkonzept Gefahrstoffe: Handlungshilfe für die Anwendung der Gefahrstoffverordnung bei Gefahrstoffen ohne Arbeitsplatzgrenzwert in Klein- und Mittelbetrieben, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), 2005
- [2] Russel, R. M., Maidment, S. C., Brooke, I., Topping, M. D.: An Introduction to a UK Scheme to Help Small Firms Control Health Risks from Chemicals, *Annals of Occupational Hygiene* 42, No. 6, 367-376, 1998
- [3] M. Brooke: A UK Scheme to Help Small Firms Control Health Risks from Chemicals: Toxicological Considerations, *Ann. Occup. Hyg.*, Vol 42, No.6 pp. 377-370, 1998
- [4] S. C. Maidment: Occupational Hygiene Considerations in the Development of a Structured Approach to Select Chemical Control Strategies, *Ann. Occup. Hyg.*, Vol. 42, No. 6, pp. 391-400, 1998
- [5] Sobol, I. M.: *Die Monte-Carlo-Methode*, Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1991
- [6] A. Braasch, N. Rupprich: Einfaches Maßnahmenkonzept Gefahrstoffe: Empirische Zusammenhänge von Einstufung und Arbeitsplatzgrenzwert. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Januar 2005
- [7] Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS): Technische Regeln für Gefahrstoffe, TRGS 900, Arbeitsplatzgrenzwerte, Ausgabe: Mai 2004
- [8] M. Tischer, S. Bredendiek-Kämper, U. Poppek: Evaluation of the HSE COSHH Essentials Exposure Predictive Model on the Basis of BAuA Filed Studies and Existing Substances Exposure Data, *Ann. Occup. Hyg*, Vol. 47, No. 7, pp. 557-569, 2003
- [9] M. Tischer, S. Bredendiek-Kämper, U. Poppek: Inhalative und dermale Exposition bei verschiedenen Schutzstufen – Teil 1: Schutzstufenbezogene Auswertung vorliegender Expositionsinformationen, Endbericht, Gründruck der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund/Berlin/Dresden, 2003
- [10] S. Hartwig, F. Binder, J.-H. Kim, A. Rupp, M. Sturm: Inhalative und dermale Exposition bei verschiedenen Schutzstufen, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, GA 65, Dortmund/Berlin/Dresden 2005

- [11] Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS): Leitfaden für das Risikomanagement des AGS bei Entscheidungen mit weitreichenden Auswirkungen. Beschlossen vom AGS am 18.11.1998
- [12] F. Kalberlah, M. Bloser, C. Wachholz: Toleranz- und Akzeptanzschwelle für Gesundheitsrisiken am Arbeitsplatz, Abschlussbericht zu - Projekt F 2010 - im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund/Berlin/Dresden 2005
- [13] E. Lechtenberg-Auffarth, D. Minkwitz, T. Neustadt, N. Rupprich, S. Ueberschär-Darschnik, U. Wölcke, V. Wölfel: Neue Stoffe am Arbeitsplatz: Ein Bewertungskonzept, Amtliche Mitteilungen der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, März 1994
- [14] Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS): Technische Regeln für Gefahrstoffe, TRGS 402, Ermittlung und Beurteilung der Konzentrationen gefährlicher Stoffe in der Luft in Arbeitsbereichen, Ausgabe: November 1997
- [15] Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS): Technische Regeln für Gefahrstoffe, TRGS 403, Bewertung von Stoffgemischen in der Luft am Arbeitsplatz, Ausgabe: Oktober 1989
- [16] Guide to Using @RISK, Risk Analysis and Simulation Add-Inn for Microsoft Excel, Version 4.5, Palisade Corporation, New York, 2002
- [17] Rappaport S.M., Kromhout H., Symanski E., Variation of exposure between workers in homogeneous exposure groups. Am. Ind. Hyg. Ass. J. 54; 654-662, 1993
- [18] Rupprich, Braasch, Guhe (2004) Anlage zum Bericht "Schutzstufenkonzept für Gefahrstoffe am Arbeitsplatz: Das Schutzniveau der anzustrebenden Luftkonzentrationen"
- [19] Trampisch, H. J., Windeler, J., Ehle, B., Lange, S., Medizinische Statistik, Springer Verlag , Berlin, Heidelberg, New York 1977
- [20] Fahrmeir, L., Künstler, R., Pigeot, I., Tutz, G.: Statistik: Der Weg zur Datenanalyse, Springer Verlag Berlin Heidelberg 2004
- [21] Görner, B., Hohmann, R., Wölfel, V.: Gefahrstoffe in Offsetdruckereien: Stoffbelastungen, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz –Gefährliche Arbeitsstoffe GA 46, Dortmund 1996

- [22] Voulaire, E.: Gefahrstoffe in Klein- und Mittelbetrieben: Neue Wege überbetrieblicher Unterstützung, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Fb 703, Dortmund 1995
- [23] Russel, R.M., Maidment, S.C., Brooke, I., Topping, M.D. (1998) An Introduction to a UK Scheme to Help Small Firms Control Health Risks from Chemicals. *Annals of Occupational Hygiene* 42, No. 6, 367-376
- [24] Hans-Jürgen Andreß: Glossar zur Datenerhebung und statistischen Analyse. Universität Bielefeld, 2001,
<http://psydok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2004/268/html/index.html>
- [25] K. Schneider, M. Hassauer, J. Oltmans, U. Schuhmacher-Wolz, e. Elmshäuser, O. Mosbach-Schulz: Wahrscheinlichkeitsrechnung als Hilfsmittel zur Wirkungsabschätzung bei Arbeitnehmern. Fb 1012 Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund/Berlin/Dresden, 2004
- [26] E. Limpert, W.A. Stahl: Das Leben ist multiplikativ – neue Aspekte zur Verteilung von Daten. Bericht über die 53. Tagung 2002 der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs, BAL Gumpenstein, 26.-28. November 2002
- [27] Eickmann, U.: Kategorisierende Expositionsmodelle. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, S. 301, 65 (2005) Nr. 7/8 – Juli/August
- [28] The Technical Basis for COSHH Essentials: Easy Steps to Control Chemicals (Guidance Booklets), Health and Safety Executive (HSE), May 1999
www.choshh-essentials.org.uk/assets/live/CETB.pdf
- [29] Efron, Bradley und Robert Tibshirani, 1993: An introduction to the bootstrap. New York: Chapman and Hall
- [30] Van der Voet, H., Slob, W.: Integration of probabilistic Exposure Assessment and Probabilistic Hazard Characterization. *Risk Analysis*, Vol. 27 No., 2007
- [31] Sachs, Lothar: Angewandte Statistik: Anwendung statistischer Methoden. 10. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York, Springer 2002
- [32] Rappaport, S.M. and S. Selvin: A Method for Evaluating the Mean Exposure from a Lognormal Distribution. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 48: 374-379 (1989)
- Selvin, S. and S.M. Rappaport: A Note on the Estimation of the Mean Value from a Lognormal Distribution. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 50: 627-630 (1989)
- [33] Wolfram, Stephen, *Mathematica Book*, 5th edition, Wolfram Media, 2003

- [34] Siebert, Bernd R.L.: Berechnung der Messunsicherheit mit der Monte-Carlo-Methode.

11 Verzeichnis der Tabellen

Tab. 6.1	Datenquellen	27
Tab. 6.2	Verteilung der AGW der TRGS 900 (Stand: Januar 2006) auf die Gefährlichkeitsgruppen	29
Tab. 8.1	Summenprozente für ausgewählte BWI- bzw. RCR-Werte	39
Tab. 8.2	Prozentanteile für ausgewählte BWI- bzw. RCR-Werte (gepoolte Daten)	40
Tab. 8.3	Datenquellen für die generische Modellbildung (Exposition)	43
Tab. 8.4	Prozentanteile für ausgewählte RCR-Werte (generische Simulation)	44

12 Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1.1	Der Control-Banding Ansatz	7
Abb. 3.1	Beispiele für im Rahmen des Control-Banding zulässige Mess- und Grenzwertverteilungen	13
Abb. 5.1	Zerlegung des vorhandenen Datenpools in Teilmengen (die mit \circ bezeichneten Messdaten erfüllen nicht die Auswahlkriterien)	18
Abb. 5.2	Beispiel einer BWI-Häufigkeitsverteilung für das Control-Banding Szenario: B, EPL2, CS1	20
Abb. 5.3	Gegenüberstellung der beiden Vorgehensweisen	21
Abb. 5.4	Beispielsequenz für eine Monte-Carlo-Simulation (Spielzahl $n = 500$)	24
Abb. 7.1	Häufigkeitsverteilung der BWI für das Szenario EPL3, CS1	33
Abb. 7.2	Häufigkeitsverteilungen der BWI für das Szenario EPL2, CS1	34
Abb. 8.1	Branchenspezifische Auswertung und Simulation für das Szenario EPL2, CS1, Gefährlichkeitsgruppe B (+A)	38
Abb. 8.2	Auswertung und Simulation für das Szenario EPL2, CS1, Gefährlichkeitsgruppe B(+A) auf Basis gepoolter Branchendaten	41
Abb. 8.3	Ergebnisse der generischen Auswertung und Simulation	46

Anhang

Anhang A

Mathematischer Hintergrund	60
A.1 Analytische Berechnung der RCR-Verteilung	60
A.2 Anmerkungen zum Poolen von Daten	63
A.3 Anmerkungen zu Korrelationen	65
A.4 Anmerkungen zur Verteilungsanpassung	68

Anhang B

Der Control-Banding Ansatz des EMKG für inhalative Gefährdungen	70
B.1 Gefährlichkeitsgruppen und anzustrebende Luftkonzentrationsbereiche	70
B.2 Expositionspotenzial	71
B.3 Das Expositionsmodell	74
B.4 Ermittlung des erforderlichen Maßnahmenpaketes	76
B.5 Umsetzung der Maßnahmenpakete	78

Anhang A

Mathematischer Hintergrund

Gegenstand dieses Anhangs ist die analytische Berechnung der RCR-Verteilung aus der Expositions- bzw. Grenzwertverteilung. Erst diese Analyse ermöglicht ein genaueres Verständnis der Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation. Darüber hinaus werden die Grenzen der Modellierung deutlich, insbesondere wenn Korrelationen vorliegen oder wenn Daten gepoolt werden.

Ausgangspunkt der folgenden Überlegungen ist im Wesentlichen die Annahme, dass die Risk Characterisation Ratio (RCR) für ein bestimmtes Control-Banding Szenario das Ergebnis eines Zufallsprozesses¹⁶ ist. Im Rahmen der Wahrscheinlichkeitstheorie spricht man auch von einem Zufallsexperiment. In unserem Zusammenhang ist das Zufallsexperiment eine Arbeitsplatzsituation, die durch bestimmte Randbedingungen, wie z. B. Lüftungssituation, Freisetzungspotenzial, Stoffeinsatz etc., gekennzeichnet ist. Der Ausgang eines solchen Zufallsprozesses wird im Rahmen der Wahrscheinlichkeitstheorie mit dem Begriff *Ereignis* gekennzeichnet. So sind mögliche Ereignisse beispielsweise die Expositionshöhe 6 mg/m^3 und der Grenzwert 3 mg/m^3 . Aus diesen Elementarereignissen resultiert dann (gemäß Gl. 4.1) das zusammengesetzte Ereignis $\text{RCR} = 2$. Im Folgenden wird gezeigt, wie die Wahrscheinlichkeiten solcher Ereignisse berechnet werden können.

A.1 Analytische Berechnung der RCR-Verteilung

Es wird zunächst davon ausgegangen, dass man jeder Modellvariablen eine Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung beordnen kann, die die Kenntnisse über die Variabilität der Modellvariablen widerspiegelt. Ferner wird unterstellt, dass der Prozess der Verteilungsanpassung, der von den stichprobenartig erhobenen Daten zu einer mathematischen Verteilung führt, abgeschlossen ist (Anmerkungen zur Verteilungsanpassung finden sich in A. 4).

Um Ereigniswahrscheinlichkeiten in allg. Form zu berechnen, wird nun eine Modellfunktion¹⁷ formuliert, welche die Eingangsvariablen des Modells (X_n) mit dem Modelloutput (Y) verknüpft. Für N Eingangsvariablen schreibt man in allgemeiner Form:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (\text{A.1.1})$$

¹⁶ Dabei wird unter einem Zufallsexperiment ein unter reproduzierbaren Bedingungen wiederholbares Experiment verstanden, dessen Ausgang im Einzelfall nicht mit Sicherheit vorausgesagt werden kann – man weiß, was möglich ist, nicht aber, was der Fall ist. Das heißt nicht, dass nicht im Prinzip der Ausgang des Zufallsprozesses durch physikalische oder sonstige Gesetzmäßigkeiten bestimmt wird. Aber die Möglichkeiten der exakten Vorhersage finden irgendwann eine Grenze, wenn die Fülle der dabei zu berücksichtigenden Faktoren und deren Messung die Möglichkeiten der praktischen Untersuchung übersteigen. Zum Beispiel ist es unmöglich, alle Expositions-determinanten (Lüftung, Dampfdruck etc.) derart genau zu erfassen, dass man mit Sicherheit vorhersagen kann, welche Expositionshöhe letztendlich erreicht wird.

¹⁷ Im Rahmen der Risikocharakterisierung wird diese Funktion über den RCR ($\text{RCR} = \text{Expo}/\text{Grenzwert}$) definiert.

Um zu sehen, wie man die Verteilung des Modelloutputs Y aus den Verteilungen der Eingangsvariablen X erhält, wird ein ganz einfaches Würfel-Beispiel vorgestellt, dass im Wesentlichen aus [34] übernommen wurde:

- Es werden zwei voneinander unabhängige Eingangsvariablen betrachtet (die Augenzahlen von zwei Würfeln)
- Das Modell¹⁸ ist gegeben durch $f(X_1, X_2) = X_1 + X_2$
- die dem Modellinput X_1 und X_2 beigeordneten Verteilungsdichten sind identisch: $g_{X_i}(\xi_i) = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 \delta(j - \xi_i)$, $\xi_i \in \mathfrak{N}$ für $i = 1, 2$; wobei \mathfrak{N} natürliche ganze Zahlen bedeutet

In Worten: Es wird die Verteilung der Augenzahlsummen gesucht, die man erhält, wenn man zwei ideale Würfel (die das Zufallsexperiment darstellen) unendlich oft wiederholt wirft. Die Verteilung des Modelloutputs Augenzahlsumme $g_Y(\eta)$ ist diskret, und für η sind Werte zwischen 2 und 12 möglich. Um die Verteilung zu bestimmen, wird einfach für jeden Wert η abgezählt, wie viele Möglichkeiten es gibt, genau diese Augenzahlsummen zu erreichen. Die (diskrete) Wahrscheinlichkeit für η ist dann diese Anzahl der Möglichkeiten multipliziert mit der Wahrscheinlichkeit, irgendeine Augenzahlsumme zu erhalten, hier also mit $1/36$. In Abbildung A1.1 ist das Ergebnis graphisch dargestellt.

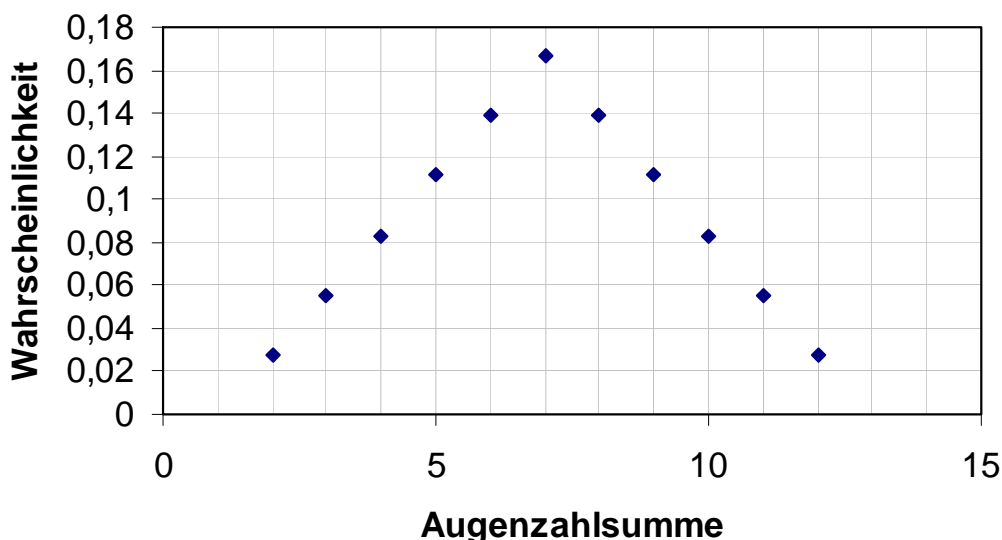


Abb. A.1.1 Augenzahlsumme vs. Wahrscheinlichkeit

Den oben beschriebenen Rechenweg kann man als Formel angeben:

¹⁸ Um das Beispiel möglichst einfach zu halten, wurde als Modellfunktion die Summenbildung gewählt. Andere, beliebig komplexe, Funktionen sind natürlich möglich.

$$g_Y(\eta) = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 g_{X_1}(\xi_{1,i}) \cdot g_{X_2}(\xi_{2,j}) \cdot \delta(\eta - f_Y(\xi_{1,i}, \xi_{2,j})) \quad (\text{A.1.2})$$

Die δ -Funktion „sortiert“ aus allen möglichen Kombinationen jeweils diejenigen heraus, für die gilt $\eta = f(\xi_{1,i}, \xi_{2,j})$, weil sie dann den Wert Eins annimmt, wohingegen sie für alle anderen Argumente den Wert Null annimmt.

In Gleichung (A.1.2) wurde das Produkt ($g_{X_1}(\xi_{1,i}) \cdot g_{X_2}(\xi_{2,j})$) der (diskreten) Verteilungen verwendet, weil das Produkt nach den Regeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung die Wahrscheinlichkeit für das gemeinsame Auftreten der Ereignisse (Augenzahlen) ξ_1 und ξ_2 angibt. Dies ist jedoch nur dann gerechtfertigt, wenn die Würfel der beiden Würfeln von einander unabhängig sind und daher die Eingangsvariablen X_1 und X_2 nicht korreliert sind. Im Allgemeinen können Modellvariablen aber voneinander abhängen. Um dies formal offen zu lassen schreibt man statt $g_{X_1}(\xi_{1,i}) \cdot g_{X_2}(\xi_{2,j})$ auch $g_{X_1, X_2}(\xi_{1,i}, \xi_{2,j})$. Anmerkungen zur Korrelation finden sich in A

Da man es in der Praxis in der Regel mit kontinuierlichen Verteilungen zu tun hat, muss die oben beschriebene diskrete Lösung noch entsprechend erweitert werden. Die Verallgemeinerung für kontinuierliche Verteilungen erreicht man, indem die Summation durch Integration und die diskreten Argumente $\xi_{1,i}$ und $\xi_{2,j}$ durch kontinuierliche ξ_1 und ξ_2 ersetzt werden:

$$g_Y(\eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} g_{X_1, \dots, X_N}(\xi_1, \dots, \xi_N) \cdot \delta(\eta - f_Y(\xi_1, \dots, \xi_N)) \cdot d\xi_1, \dots, d\xi_N \quad (\text{A.1.3})$$

Gleichung A.1.3 erlaubt somit die Berechnung der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung des Modelloutputs $g_Y(\eta)$ aus den Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen ($g_{X_1, \dots, X_N}(\xi_1, \dots, \xi_N)$) der Eingangsvariablen des Modells. Die Lösung des Integrals ist auf analytischem Wege allerdings nur in wenigen, vergleichsweise einfach gelagerten Fällen möglich (ein Beispiel findet sich in A.3). In den meisten praktisch interessanten Fällen muss das Integral entweder durch numerische Integration oder durch die Monte-Carlo-Methode berechnet werden (wie in dieser Arbeit geschehen). Gleichwohl lassen sich aufgrund der Struktur von Gleichung (A.1.3) einige Schlussfolgerungen in allg. Form zusammenfassen:

1. Bei unabhängigen, nicht korrelierten Eingangsvariablen sind die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen über ein einfaches Produkt miteinander verknüpft.
2. Liegen Korrelationen vor, sind diese in der gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Eingangsvariablen zu berücksichtigen. Je nach Stärke der Korrelation beeinflusst dies auch den Modelloutput mehr oder weniger stark.

3. In Gleichung A.1.3 geht jeweils nur eine Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung pro Eingangsvariable ein. Das heißt, die Dichteverteilungen repräsentieren im Idealfall jeweils nur eine homogene Grundgesamtheit.

Die unter 3. formulierte Bedingung einer homogenen Grundgesamtheit ist in der Praxis häufig nur näherungsweise oder überhaupt nicht erfüllt. Die gilt insbesondere, wenn Daten aus unterschiedlichen Quellen (aber ähnlichen Merkmalen) gepoolt werden.

A.2 Anmerkungen zum Poolen von Daten

Um zu klären unter welchen Bedingungen Daten gepoolt werden können, ohne dass Einbußen bei der Modellgenauigkeit bzw. Richtigkeit zu befürchten sind, ist zunächst der Begriff „homogene Grundgesamtheit“ näher zu beleuchten.

Bei der Modellanpassung versucht man in der Regel ein einfaches Modell (beispielsweise die Rechteckverteilung) zur Beschreibung der Daten zu verwenden. Häufig zeigt sich jedoch, dass ein vermutetes Modell dazu nicht in der Lage ist. Beispielsweise kann die grafische Darstellung der Häufigkeiten einer Stichprobe multimodal sein, was nicht zur regelmäßigen Gestalt der Rechteckverteilung passt. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass die Population, aus der die Daten stammen, heterogen ist. Damit ist gemeint, dass die Population aus verschiedenen Gruppen (Subpopulationen) besteht, bei denen sich die Verteilung des betrachteten Merkmals unterscheidet und so zu der Multimodalität führt. Betrachtet man beispielsweise eine Anzahl von Stoffen, die zwei unterschiedlichen Gefährlichkeitsgruppen angehören, so wäre ein Histogramm der gepoolten Grenzwerte wahrscheinlich nicht unimodal und somit das zugehörige Modell keine einfache Rechteckverteilung. Es ist offensichtlich, dass die betrachtete Grundgesamtheit aus zwei Gruppen besteht, den gefährlichen und den weniger gefährlichen Stoffen und es ist auch offensichtlich, dass sich die Verteilung des Merkmals in den beiden Gruppen unterscheidet. Dabei ist es gut möglich, dass die (bedingten, d. h. gefährliche bzw. weniger gefährliche Stoffe) Verteilungen jeweils vom Typ „Rechteck“ ist, die unbedingte Verteilung des Merkmals ist jedoch eine Mischverteilung.

Um zu verstehen, welchen Einfluss heterogene Daten auf die Modellbildung haben, wird zunächst der Fall unkorrelierter Eingangsvariablen betrachtet. Das heißt, der Ausdruck $g_{X_1, \dots, X_N}(\xi_1, \dots, \xi_N)$ in Gl. A.1.3 kann (bei zwei Variablen) durch das einfache Produkt $g_{X_1}(\xi_1) \cdot g_{X_2}(\xi_2)$ ersetzt werden. Es wird nun angenommen, dass sich eine der Dichtefunktionen (z. B. $g_{X_2}(\xi_2)$) als Mischverteilung

$$g_{X_2}(\xi_2) = a \cdot u(\xi_2) + b \cdot v(\xi_2) \quad (\text{A.2.1})$$

darstellen lässt. Das heißt, die Eingangsvariable X_2 entstammt zwei Grundgesamtheiten, so dass es sich eigentlich um zwei (Zufalls-)Variablen handelt, deren Dichteverteilungen ($u(\xi_2)$, $v(\xi_2)$) Subpopulationen repräsentieren. Die Faktoren a und b stellen die Gewichte (Mischungsparameter) dieser Verteilungen dar. Aus A.1.3 ergibt sich dann unter Berücksichtigung von A.2.1 und nach der Summenregel der Integralrechnung

$$\begin{aligned}
g_Y(\eta) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_{X_1}(\xi_1) \cdot a \cdot u(\xi_2) \cdot \delta(\eta - (\xi_1 / \xi_2)) \cdot d\xi_1 d\xi_2 \\
&+ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_{X_1}(\xi_1) \cdot b \cdot v(\xi_2) \cdot \delta(\eta - (\xi_1 / \xi_2)) \cdot d\xi_1 d\xi_2
\end{aligned} \tag{A.2.2}$$

Ein konkretes (aber hypothetisches) Beispiel für diesen Fall ist in Abb. A.2.1 dargestellt. Es wird angenommen, dass die Expositionsverteilung $g_{X_1}(\xi_1)$ eine Lognormalverteilung ist. Die Grenzwertverteilung $g_{X_2}(\xi_2)$ ergibt sich durch Addition (Poolen) der beiden Rechteckverteilungen $a \cdot u(\xi_2)$ und $b \cdot v(\xi_2)$. Die Mischungsparameter a und b betragen jeweils 0,5, können aber im Prinzip beliebige Werte annehmen, solange $a+b=1$ ist (Normierungsbedingung). Die Funktion $f_Y(\xi_1, \xi_2) = \eta$ ist der Quotient ξ_1 / ξ_2 also die RCR. RCR_u bzw. RCR_v bezeichnen die RCR-Verteilungen, die jeweils mit der Rechteckverteilung $u(\xi_2)$ und $v(\xi_2)$ korrespondieren.¹⁹ Entscheidend ist nun, dass die Summe $RCR_u + RCR_v$ identisch ist mit RCR_{u+v} . Das heißt, die gepoolte Verteilung RCR_{u+v} ergibt sich einfach durch Addition (Poolen) der heterogenen Einzelverteilungen RCR_u bzw. RCR_v . Diese Identität ist allerdings nur dann gegeben, wenn die Verteilung der anderen Eingangsvariablen, nämlich die Expositionsverteilung $g_{X_1}(\xi_1)$, auf eine homogene Grundgesamtheit zurückgeht.

Sind beide Dichteverteilungen der Eingangsvariablen Mischverteilungen, treten in A.2.2 Mischterme auf. Das heißt, es werden Verteilungen miteinander kombiniert, die sowohl auf der Expositions- als auch auf der Grenzwertseite auf heterogene Populationen zurückgehen. In diesem Fall kann das Poolen von Daten zu mehr oder weniger großen Fehlern bei der Modellbildung führen.

¹⁹ Das bei diesen Annahmen aus Gl. A.2.2 resultierende Integral konnte mit Mathematica® 5.2 gelöst werden.

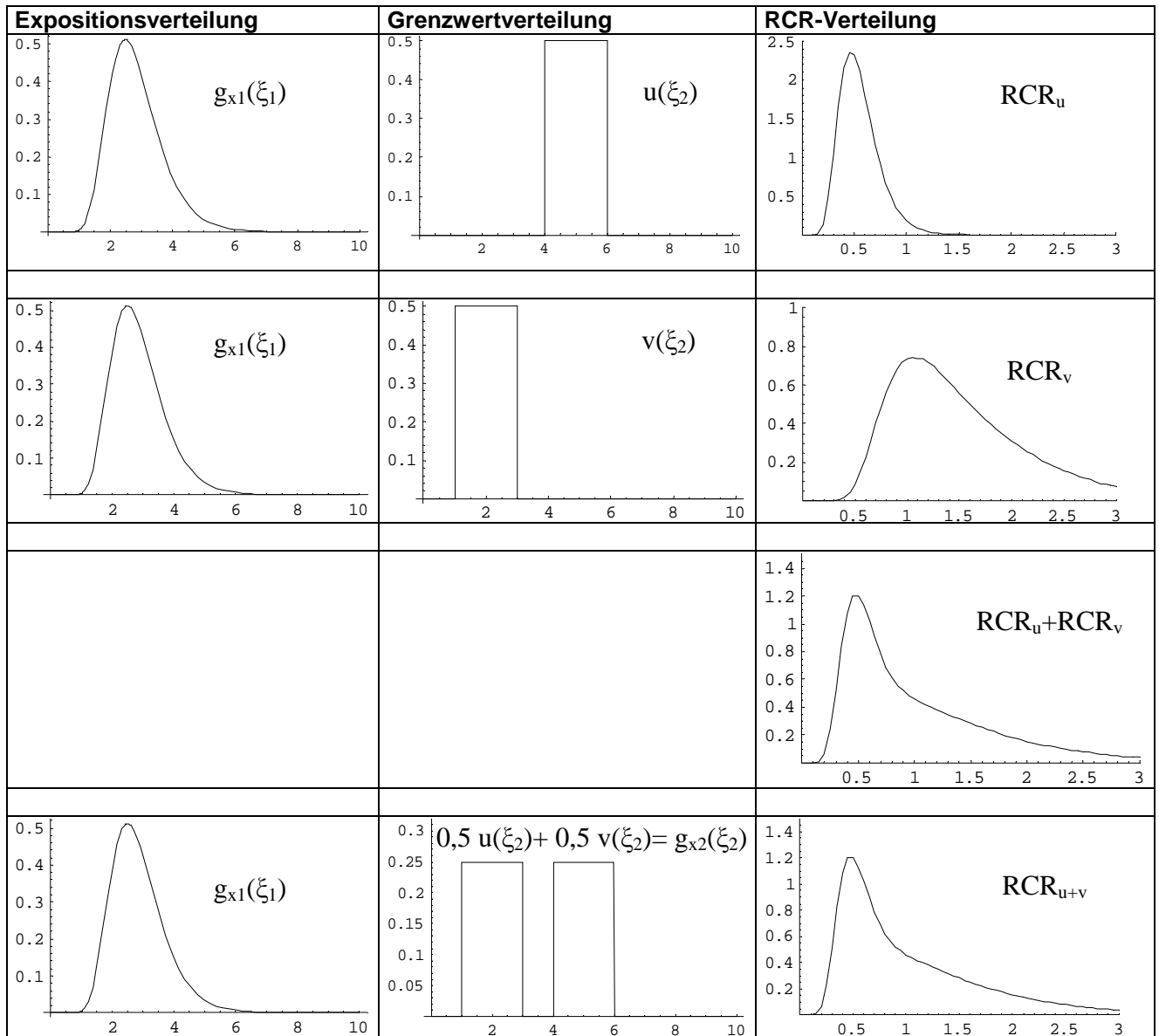


Abb. A.2.1 Einfluss von gepoolten Daten auf die Modellbildung

A.3 Anmerkungen zu Korrelationen

Bisher wurde von unkorrelierten Eingangsvariablen ausgegangen. Im Prinzip können aber z. B. die Expositionshöhe und der Grenzwert miteinander korrelieren. Eine Vermutung wäre, dass hohe Grenzwerte mit hohen Expositionen korrelieren und umgekehrt. Die Stärke der Korrelation lässt sich mit Hilfe von Korrelationskoeffizienten quantifizieren. Treten Korrelationen auf, müssen diese in der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen $g_{x1, \dots, xN}(\xi_1, \dots, \xi_N)$ der Gleichung A.1.3 berücksichtigt werden. Allerdings lässt sich der Ausdruck $g_{x1, \dots, xN}(\xi_1, \dots, \xi_N)$ dann nicht einfach als das Produkt $g_{x1}(\xi_1) \cdot g_{x2}(\xi_2) \dots g_{xN}(\xi_N)$ der (Rand)Verteilungen schreiben. Vielmehr handelt es sich häufig um relative komplexe Ausdrücke. Für den Fall korrelierter, lognormal-

verteilter Eingangsvariablen X_1, X_2 ergibt sich zum Beispiel die bivariate Lognormalverteilung²⁰:

$$g_{x_1, x_2}(\xi_1, \xi_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}\xi_1\xi_2} \times \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\left(\frac{\log \xi_1 - \mu_1}{\sigma_1}\right)^2 - 2\rho\frac{(\log \xi_1 - \mu_1)(\log \xi_2 - \mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \left(\frac{\log \xi_2 - \mu_2}{\sigma_2}\right)^2\right]\right\} \quad (\text{A.3.1})$$

Um einen ersten Eindruck bezüglich des Einflusses von Korrelationen auf die Modellbildung zu gewinnen, wurde Gl. A.1.3 unter Berücksichtigung von Gl. A.1.1 mit Hilfe der Computer-Algebra-Software „Mathematica“ [33] gelöst. Für die Mittelwerte $\mu_1=\mu_2=1$ und die Standardabweichungen $\sigma_1=\sigma_2=1$ und den Pearsonschen Korrelationskoeffizienten ρ als Parameter ergeben sich die in Abb. A.3.1 dargestellten Kurvenverläufe. In der Spalte „bivariate Lognormalverteilungsdichte“ ist die (hypothetische) zweidimensionale Dichteverteilung der Variablen „Exposition“ und „Grenzwert“ sowie die Projektion der Dichte auf die x,y-Ebene dargestellt. Die Spalte „Dichteverteilung des Modelloutputs“ zeigt die berechneten Dichtekurven des Quotienten Exposition/Grenzwert.

Die Kurven bestätigen im Wesentlichen die Vermutung, dass schwache Korrelationen nur einen geringen Einfluss auf den Modelloutput haben. Ob dieser Zusammenhang auch für andere bivariate Verteilungen zutrifft, wurde nicht weiter untersucht. Zu klären ist auch, welchen Einfluss das Poolen von korrelierten Daten auf das Modellergebnis hat. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

²⁰ Die bivariate Lognormalverteilung wurde beispielhaft untersucht, weil hierfür ein relativ einfacher, analytischer Ausdruck zur Verfügung steht. Es ist allerdings nach bisher vorliegenden Erkenntnissen davon auszugehen, dass nur die Expositionsverteilung durch eine Lognormalverteilung abgebildet wird. Dagegen sind für die Grenzwertverteilung komplexere Verteilungsmodelle erforderlich.

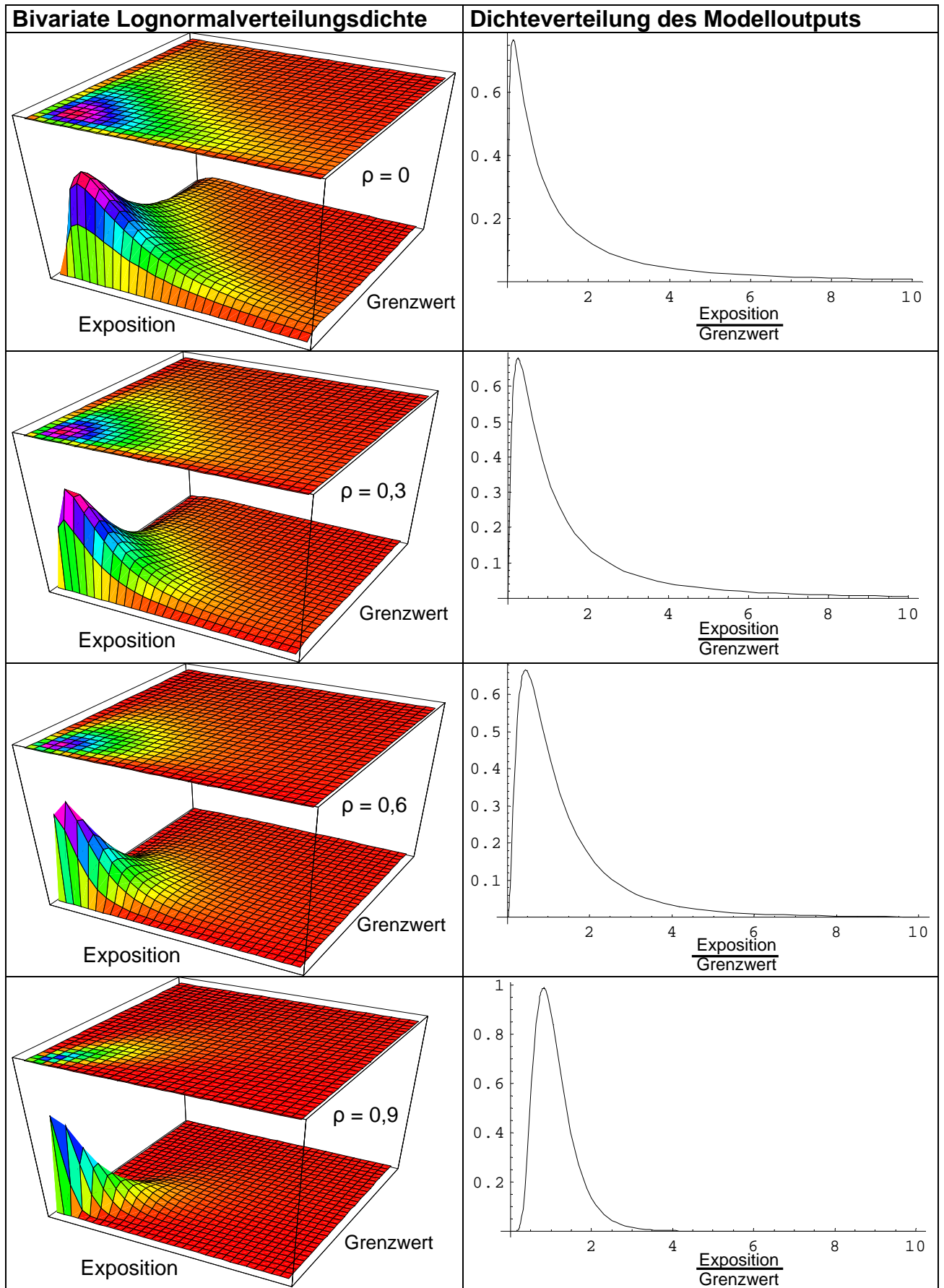


Abb. A.3.1 Einfluss von Korrelationen auf die Modellierung

A.4 Anmerkungen zur Verteilungsanpassung

Zur Durchführung der Monte-Carlo-Simulation werden Verteilungen benötigt, welche die Variabilität der Eingangsvariablen (Expositionshöhe, Grenzwert) widerspiegeln. Das Verfahren zur Gewinnung von Verteilungsfunktionen aus empirischen Daten wird mit dem Begriff Verteilungsanpassung bezeichnet. Im Rahmen der Verteilungsanpassung sind einige grundlegende Zusammenhänge zu beachten:

Liegen für eine Eingangsvariable empirische Beobachtungen vor, so bilden auch diese beobachteten Werte eine Verteilung, nämlich die empirische Verteilung der Stichprobe [25]. Die empirische Verteilung ist jedoch bei kleinen Stichproben mit Unsicherheiten behaftet. Das heißt, es ist unsicher, ob unter einer anderen Stichprobe eine andere Verteilung abgeleitet worden wäre. Zwar gibt die empirische Verteilung die beobachteten Werte sehr genau wieder. Es kann aber zu einem *Overfitting* kommen, insbesondere dann, wenn sich die „wahre“ Verteilung durch sehr viel einfachere Funktionen, z. B. Lognormalverteilung, beschreiben lässt. Zur Modellierung der Eingangsvariablen werden deshalb häufig theoretisch abgeleitete, Verteilungen (Lognormalverteilung, Rechteckverteilung etc.) an die empirische Verteilung angepasst. So ist z. B. die Lognormalverteilung anerkanntermaßen [32] als Modell zur Beschreibung von Expositionsverteilungen gut geeignet, da die Expositionsdeterminanten (z. B. Dampfdruck, Luftwechsel etc.) im Wesentlichen multiplikativ²¹ [26] zusammenwirken. In dieser Arbeit wurde daher generell die Lognormalverteilung als Modell zur Beschreibung der Expositionshöhe verwendet.

Anders stellt sich die Situation bei der Modellierung von Grenzwertverteilungen dar. Hier weisen die bisher vorliegenden Beobachtungsdaten in der Histogrammdarstellung häufig nicht darauf hin, dass eine einfache, theoretische Verteilung zugrunde liegt. Der Grund hierfür liegt in dem Auswahlprozess der Arbeitsstoffe, der durch eine Vielzahl technologischer, chemischer und ökonomischer Kriterien gesteuert wird. Dies führt zu vergleichsweise unregelmäßig verteilten Einsatzhäufigkeiten, die von Betrieb zu Betrieb unterschiedlich sein können. In diesem Fall führt das Poolen von Daten nur unter bestimmten Bedingungen zu exakten Modellierungsergebnissen (s. A.2).

Um den unregelmäßigen Verteilungsverlauf zumindest näherungsweise abzubilden und andererseits ein *Overfitting* zu vermeiden, wurde zur Verteilungsanpassung folgendes Verfahren gewählt: Mit Hilfe des Computerprogramms @RISK wurde zunächst aus den Beobachtungsdaten das Histogramm berechnet. Die Hüllkurve des Histogramms diente dann (nach Normierung der Fläche auf 1) als Verteilungsfunktion zur Erzeugung der Zufallszahlen mit @RISK. Grundsätzlich sind eine Reihe anderer Verfahren zur Verteilungsanpassung denkbar, die sich immer in dem Spannungsfeld „möglichst genaue Replikation der Beobachtungsdaten vs. möglichst einfaches Verteilungsmodell“ bewegen. Eine mögliche Alternative stellt auch das Bootstrap Verfahren dar, das die interessierende Verteilung direkt aus der Stichprobe rekonstruiert [29, 30]. Welches Verfahren tatsächlich ein Optimum darstellt, ist gegenwärtig unentschieden. Hier besteht weiterer Klärungsbedarf.

²¹ Die Entstehung einer Lognormalverteilung kann im Unterschied zur „additiven“ Normalverteilung darauf zurückgeführt werden, dass viele Zufallsgrößen multiplikativ zusammenwirken.

Rein rechnerisch wurden sämtliche Verteilungsanpassungen und die anschließende Generierung von Zufallszahlen mit Hilfe des Computerprogramms @RISK durchgeführt. @RISK ist ein "Add-In" zu Microsoft EXCEL, das Risikoanalysen und Simulationen unterstützt. Die Optionen zur *Verteilungsanpassung* ermöglichen den Vergleich der (empirischen) Verteilung einer Variablen mit einer großen Zahl von theoretischen Verteilungen. Für die Anpassung der Lognormalverteilung wurde das BESTFIT-Modul von @RISK mit den entsprechenden Standardvorgaben gewählt.

Zur Beschreibung von korrelierten Eingangsverteilungen geht @RISK von dem Konzept der Rangkorrelation [20] aus. Die Stärke der Korrelation wird durch den Spearman'schen Korrelationskoeffizienten gemessen, der nicht die Stärke des linearen Zusammenhangs (wie der Pearsonsche Korrelationskoeffizient), sondern des monotonen Zusammenhangs misst. Mit dem in @RISK implementierten Algorithmus können auf dieser Grundlage beliebige Verteilungstypen miteinander korreliert werden. So ist es z. B. möglich, Lognormalverteilungen mit Rechteck- oder Histogrammverteilungen zu korrelieren und auf diese Weise der jeweils gegebenen Aufgabenstellung anzupassen.

Anhang B

Der Control-Banding Ansatz des EMKG für inhalative Gefährdungen

Das Einfache Maßnahmenkonzept Gefahrstoffe (EMKG) wurde als Handlungshilfe für den Umgang mit Gefahrstoffen in kleinen und mittleren Unternehmen konzipiert. Methodische Grundlage des EMKG ist der Control-Banding Ansatz der britischen COSHH Essentials, der die gefährlichen Eigenschaften von Stoffen (anhand der Einstufung) zu Gefährlichkeitsgruppen zusammenfasst („Hazard-Banding“) und dann mit anzustrebenden Luftkonzentrationsbereichen verknüpft. Ob diese Konzentrationsbereiche an Arbeitsplätzen eingehalten werden können, entscheidet ein einfaches Expositionsmodell, das als Einflussgrößen lediglich die Menge und das Expositionspotenzial des Stoffes sowie die anzuwendenden Schutzmaßnahmen berücksichtigt.

Das EMKG führt den britischen Ansatz weiter und differenziert ihn in Bezug auf die Zuordnung der Gefährdungseinstufung der Stoffe bzw. Produkte zu Gefährlichkeitsgruppen [27]. So werden die Zuordnungen der R-Sätze zu den Gefährlichkeitsgruppen insbesondere für Hautgefährdungen wesentlich differenziert und auch die Kennzeichnungsinformationen des Gefahrstoffrechtes in die Gruppenbildung eingebunden. Weiterhin geht das EMKG auf die Besonderheiten des deutschen Gefahrstoffrechts ein und verbindet die in der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) festgelegten Schutzstufen 1 bis 4 mit den Ergebnissen der Ermittlungen nach dem EMKG. Gleichwohl wird im Ergebnis ein Control-Banding Modell erhalten, das sich nur in einigen (wenigen) Punkten von den britischen COSHH-Essential unterscheidet. Im Folgenden wird auf diese Unterschiede eingegangen. Gleichzeitig werden die Determinanten des Control-Banding (Gefährlichkeitsgruppe, Expositionspotential, Maßnahmenpaket) für inhalative Gefährdungen kurz vorgestellt und erläutert. Dabei wird aus Gründen der Übersichtlichkeit und Vergleichbarkeit vorrangig die Terminologie und Darstellungsweise der COSHH Essentials verwendet. Eine ausführliche Beschreibung des Control-Banding bzw. des EMKG inklusive des Ansatzes für Hautgefährdungen findet sich in [4, 28].

B.1 Gefährlichkeitsgruppen und anzustrebende Luftkonzentrationsbereiche

Um die von einem Stoff oder einer Zubereitung ausgehende Gesundheitsgefahr möglichst einfach und pragmatisch fassen zu können, wird ein Ansatz gewählt, der im Wesentlichen die EU-weit harmonisierten R-Sätze berücksichtigt. Grundlage für die Festlegung von R-Sätzen sind die von der EU festgelegten Kriterien zur Einstufung und Kennzeichnung von Stoffen und Zubereitungen. Im Rahmen des Control-Banding werden die insgesamt zur Verfügung stehenden R-Sätze fünf Gefährlichkeitsgruppen (A, B, C, D, E) zugeordnet. Sofern Gemische zu beurteilen sind, bestimmt der Stoff mit der höchsten Gefährlichkeit (Gefährlichkeitsgruppe) die Gefährlichkeitsgruppe des Gemischs. Für die COSHH Essentials bzw. für das EMKG bei Gefahrstoffen der Schutzstufen 2 und 3 gilt die in Tabelle B.1.1 gezeigte Zuordnung.

Tab. B.1.1 Zuordnung von R-Sätzen zu Gefährlichkeitsgruppen

Gefährlichkeits- gruppe	COSHH-Essentials zugeordnete R-Sätze	EMKG zugeordnete R-Sätze
A	Kein gesundheitsbezogener R-Satz 36, 38, 65, 66	Kein gesundheitsbezogener R-Satz 36, 38, 65, 67
B	20, 21, 22, 33, 67, 68/20, 68/21, 68/22	20, 22, 41, 68/20, 68/22
C	23, 24, 25, 34, 35, 37, 39/23, 39/24, 39/25, 41, 43, 48/20, 48/21, 48/22	34, 35, 40, 42 48/20, 48/22, 62, 63, 68 23, 25, 29, 31, 39/23, 39/25
D	26, 27, 28, 39/ 26, 39/27, 39/28, 40, 48/23, 48/24, 48/25, 60, 61, 62, 63	26, 28, 32 39/26, 39/28, 48/23, 48/25, 61
E	42, 42/43, 45, 46, 49, 68	45, 46, 49, 60

In einem nächsten Schritt werden auf der Grundlage eines Expertenurteils die Gefährlichkeitsgruppen den anzustrebenden Luftkonzentrationsbereichen für Stäube und Dämpfe zugeordnet (s. Tab. B.1.2). Diese Luftkonzentrationsbereiche sind bei den COSHH-Essentials und beim EMKG gleich geschnitten.

Tab. B.1.2 Gefährlichkeitsgruppe vs. anzustrebende Luftkonzentrationsbereiche

Gefährlichkeitsgruppe	Gesamtstaub [mg/m³]	Gas, Dampf [ppm]
A	1 - 10	50 - 500
B	0,1 - 1	5 - 50
C	0,1 - 1	0,5 - 5
D	0,001 - 0,01	0,05 - 0,5
E	< 0,001	< 0,05

B.2 Expositionspotenzial

Nach Identifizierung der Gefahrstoffe und deren Zuordnung zu Gefährlichkeitsgruppen, muss zur Gefährdungsbeurteilung das Expositionspotenzial ermittelt werden. Das Modell berücksichtigt dabei zwei Faktoren:

1. Die **physikalischen Eigenschaften** (das Staubungsverhalten von Feststoffen und die Flüchtigkeit von Flüssigkeiten).
2. Die pro Tätigkeit/Batch verwendete Menge im Verfahren.

Zur Beurteilung des Staubungsverhaltens von (zerteilten) Feststoffen wird die in Tabelle B.2.1 angegebene Klassifizierung herangezogen. Um das Modell so einfach wie möglich zu halten, werden lediglich drei Klassen unterschieden.

Tab. B.2.1 Kategorien zum Staubungsverhalten

Freisetzungsgruppe	Beschreibung des Staubungsverhaltens
hoch	Pulver (Staubwolken können für mehrere Minuten in der Luft verbleiben), z. B. Zement, Titandioxid, Toner.
mittel	Kristallförmige, körnige Feststoffe (es entstehen sichtbare Staubwolken, die aber schnell sedimentieren). Z. B. Seifenpulver.
niedrig	Granulate, körnige Feststoffe; keine Staubexposition während des Umgangs, z. B. PVC-Kügelchen.

Dieser qualitative Ansatz ermöglicht eine schnelle, pragmatisch orientierte Klassifizierung von staubenden Feststoffen. Nachteilig ist, dass die Grenzen zwischen den einzelnen Klassen unscharf gezogen sind, so dass eine Zuordnung insbesondere in Grenzbereichnähe problematisch sein kann. Ist eine Zuordnung problematisch empfiehlt das EMKG, den worst case Fall, nämlich die höhere Staubigkeitsklasse, zugrunde zu legen.

Für flüssige Stoffe nimmt das Modell zunächst anhand des Siedepunktes eine Kategorisierung der Flüchtigkeit vor. Abbildung B.2.1 zeigt die einzelnen Bereiche: **hohe** Flüchtigkeit für Siedepunkte unter 50 °C, **mittlere** Flüchtigkeit zwischen 50 und 150 °C und **niedrige** Flüchtigkeit für Siedepunkte größer als 150 °C. Außerdem ermöglicht das Diagramm die Zuordnung des Flüchtigkeitsbereiches für unterschiedliche Verfahrenstemperaturen. Alternativ zum Siedepunkt kann auch der Dampfdruck herangezogen werden. Bei Mischungen wird zur Einordnung in die Flüchtigkeitsbereiche der niedrigste Siedepunkt des Siedebereiches bzw. der höchste Dampfdruck zugrunde gelegt.

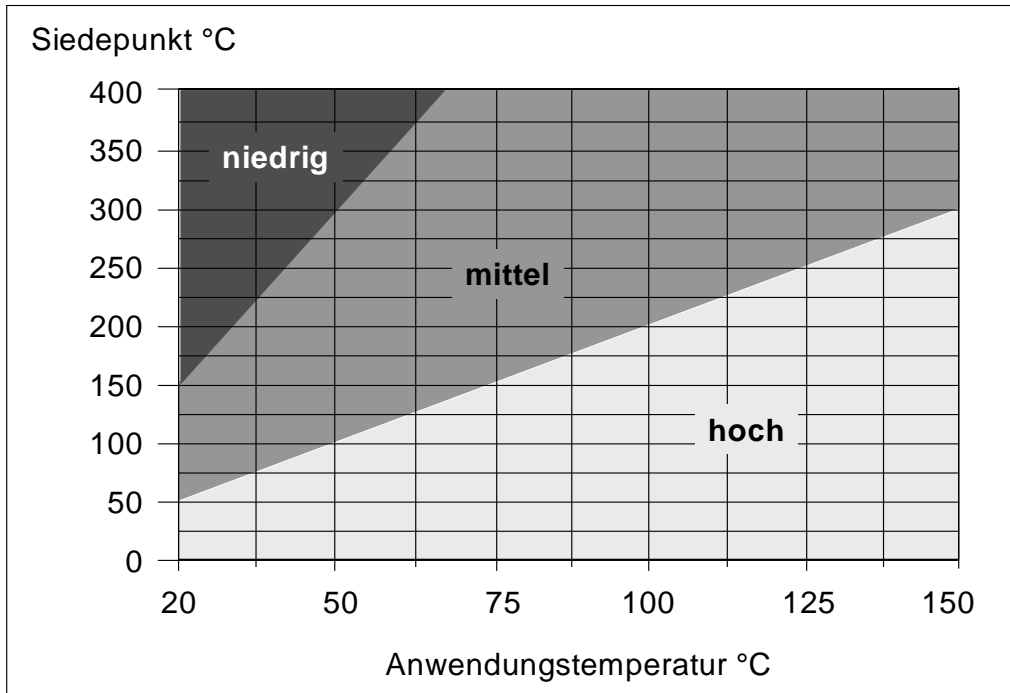


Abb. B.2.1 Diagramm zur Bestimmung der Flüchtigkeit einer Flüssigkeit [14]

Die Klassifizierung der bei einer der Tätigkeit gehandhabten Menge erfolgt anhand der Tab. B.2.2. Dabei ist zu beachten, dass nicht immer die gesamte Lager- oder Vorratsmenge eines Produktes über die Mengengruppe entscheidet, sondern dass der Tätigkeitsbezug ausschlaggebend ist. So wird zum Beispiel das Abfüllen von Litermengen aus einem Vorratstank der mehrere m^3 fasst der Mengengruppe „mittel“ zugeordnet.

Während die COSHH Essentials bezüglich der Anwendungsfläche des Produktes keine weitere Unterscheidung vornehmen, wird im Rahmen des EMKG diesbezüglich eine Zusatzbedingung formuliert. Bei flächiger Anwendung von flüssigen Produkten (z. B. Streichen, Reinigungstätigkeiten) darf für die Mengengruppe „niedrig“ die angewendete Menge 1 Liter für den gesamten Arbeitstag nicht überschreiten.

Tab. B.2.2 Definition der Mengengruppen

Mengengruppe	Feststoffe	Flüssigkeiten
niedrig	g - Bereich	ml - Bereich
mittel	kg - Bereich	l - Bereich
hoch	t - Bereich	m^3 - Bereich

Auf der Basis der nun vorliegenden Informationen zur Flüchtigkeit bzw. zum Stäubungsverhalten von Produkten und deren Anwendungsmengen können so genannte „Expositionsvorhersagebänder“²² definiert werden. Hierdurch ergeben sich für Feststoffe und Flüssigkeiten jeweils 4 Expositionsvorhersagebänder.

Tab. B.2.3 Definition der Expositionsvorhersagebänder für Feststoffe

Expositionsvorhersageband	Beschreibung
EPS1	Gramm, mittlere/geringe Aufstaubneigung
EPS2	Gramm, hohe Aufstaubneigung und Kilogramm/Tonne, geringe Aufstaubneigung
EPS3	Kilogramm, mittlere/hohe Aufstaubneigung
EPS4	Tonnen, mittlere/hohe Aufstaubneigung

Tab. B.2.4 Definition der Expositionsvorhersagebänder für Flüssigkeiten

Expositionsvorhersageband	Beschreibung
EPL1	Milliliter, niedrige Flüchtigkeit
EPL2	Milliliter, mittlere/hohe Flüchtigkeit und m ³ /Liter, niedrige Flüchtigkeit
EPL3	m ³ , mittlere Flüchtigkeit und Liter, mittlere/hohe Flüchtigkeit.
EPL4	m ³ , hohe Flüchtigkeit

B.3 Das Expositionsmodell

Der Control-Banding Ansatz geht davon aus, dass die Höhe der Exposition am Arbeitsplatz durch das Expositionspotenzial einerseits und das angewendete Maßnahmenpaket andererseits bestimmt wird. Das heißt, um die Exposition im Rahmen eines Modells vorherzusagen, müssen die oben beschriebenen Expositionsvorhersagebänder mit den Maßnahmenpaketen kombiniert werden. Insgesamt werden dabei vier Maßnahmenpakete („Control Strategy“ CS) unterschieden:

²² Im Englischen spricht man von „Exposure Predictor Bands“. Bei Feststoffen (solids) wird die Abkürzung EPS, bei Flüssigkeiten (liquids) die Abkürzung EPL verwendet.

Tab. B.3.1 Beschreibung der Maßnahmenpakete

Maßnahmenpaket	Maßnahmen
CS1	Allgemeine Lüftung und "gute Arbeitspraxis"
CS2	Emissionsminderung an der Quelle (z. B. lokale Absaugung)
CS3	Geschlossene Anlagen und Verfahren
CS4	Durch Experten festzulegende spezielle Schutzmaßnahmen

Daraus folgen schließlich die in Tabelle B.3.2 und B.3.3 aufgelisteten quantitativen Expositionsbereiche, die das Modell vorhersagt.

Tab. B.3.2 Vorhergesagte Expositionsbereiche für Staub (mg/m³)

Maßnahmenpakete	Expositionsvorhersageband			
	EPS4	EPS3	EPS2	EPS1
1	> 10	1 - 10	0,1 - 1	0,01 - 0,1
2	1 - 10	0,1 - 1	0,01 - 0,1	0,001 - 0,01
3	0,1 - 1	0,01 - 0,1	0,001 - 0,01	< 0,001

Tab. B.3.3 Vorhergesagte Expositionsbereiche für Dampf (ppm)

Maßnahmenpaket	Expositionsvorhersageband			
	EPL4	EPL3	EPL2	EPL1
1	> 500	50 - 500	5 - 50	< 5
2	5 - 500	5 - 50	0,5 - 5	< 0,5
3	0,5 - 5	0,5 - 5	0,05 - 0,5	< 0,05

Für das Maßnahmenpaket 4 gibt das Modell explizit keine Expositionsbereiche an, da hier aus technologischer Sicht nur Expertenlösungen greifen.

B.4 Ermittlung des erforderlichen Maßnahmenpaketes

Durch Umsetzung des Control-Banding Ansatzes soll der Anwender von chemischen Produkten in die Lage versetzt werden, über die für das sichere Arbeiten erforderlichen Maßnahmen zu entscheiden. Das heißt, der Anwender muss aus der Gefährlichkeitsgruppe, dem Freisetzungsverhalten und der Anwendungsmenge des Stoffes auf das für die sichere Handhabung erforderliche Maßnahmenpaket schließen können. Dieser Umkehrschluss auf das Maßnahmenpaket wird (für den Anwender nicht sichtbar) durch Vergleich der expositionsseitig erhaltenen Luftkonzentrationsbereiches (Tab. B.3.2 u. B.3.3) mit dem wirkungsseitig festgelegten anzustrebenden Luftkonzentrationsbereich (Tab. B.1.2) ermöglicht. Ersetzt man die Expositionsbereiche durch die anzustrebenden Luftkonzentrationsbereiche, erhält man den gewünschten Zusammenhang aus Gefährlichkeitsgruppe, Expositionspotenzial und Maßnahmenpaket. Tabelle B.4.1 und B.4.2 geben diesen Zusammenhang für die COSHH Essentials an.

Tab. B.4.1 Zuordnung von Gefährlichkeitsgruppe und Expositionspotenzial zu den erforderlichen Maßnahmenpaketen (COSHH Essentials, Feststoffe)

Gefährlichkeitsgruppe	Expositionsvorhersageband			
	EPS4	EPS3	EPS2	EPS1
A	2	1	1	1
B	3	2	1	1
C	Speziell	3	2	1
D	Speziell	Speziell	3	2
E	Speziell	Speziell	Speziell	Speziell

Tab. B.4.2 Zuordnung von Gefährlichkeitsgruppe und Expositionspotenzial zu den erforderlichen Maßnahmenpaketen (COSHH Essentials, Flüssigkeiten)

Gefährlichkeitsgruppe	Expositionsvorhersageband			
	EPL4	EPL3	EPL2	EPL1
A	2	1	1	1
B	2	2	1	1
C	3	3	2	1
D	Speziell	Speziell	3	2
E	Speziell	Speziell	Speziell	Speziell

Im Detail unterschiedlich sind die entsprechenden Zuordnungstabellen für das EMKG (s. Tab. B.4.3 u. B.4.4). Wie bei den COSHH Essentials können Substanzen mit be-

sonderen Risiken, also mit der Kennzeichnung T bzw. T+ und gleichzeitiger Einstufung in die Gefährlichkeitsgruppe E, durch das Konzept nicht abgedeckt werden. Hier sind spezielle Maßnahmen bzw. technische Beratung nötig. Für alle übrigen Gefahrstoffe, die mit dem Symbol „Totenkopf“ gekennzeichnet sind, gilt die Schutzstufe 3. Für diese Gefahrstoffe sind die Maßnahmen der Schutzstufe 1, 2 und 3 (nach GefStoffV) abzurufen und anzuwenden.

Gefahrstoffe, die mit dem Symbol „Xn, Xi oder C“ gekennzeichnet sind, sind in aller Regel in Schutzstufe 2 eingeordnet. Hier gelten die Maßnahmen der Schutzstufe 1 und 2, in einigen Fällen auch 3.

Tab. B.4.3 Zuordnung von Gefährlichkeitsgruppe und Expositionspotenzial zu den erforderlichen Maßnahmenpaketen (EMKG, Feststoffe)

Gefährlichkeits- gruppe	Expositionsvorhersageband			
	EPS4	EPS3	EPS2	EPS1
A	2	1 (2) ²⁴	1	1
B	3	2 (3) ²⁵	1	1
C	3 (Speziell) ²³	3 (Speziell) ²³	2	1
D	Speziell	Speziell	3	2
E	Speziell	Speziell	Speziell	Speziell

²³ Für Stoffe der Schutzstufe 3 fordert das EMKG hier technische Beratung.

²⁴ Für stark staubende Stoffe, die in kg-Mengen eingesetzt werden, fordert das EMKG hier den Einsatz von technischen Maßnahmen.

²⁵ Das EMKG fordert hier für Stoffe mit mittlerer Staubneigung, die im Tonnenbereich gehandhabt werden, den Einsatz geschlossener Systeme.

Tab. B.4.4 Zuordnung von Gefährlichkeitsgruppe und Expositionspotenzial zu den erforderlichen Maßnahmenpaketen (EMKG, Flüssigkeiten)

Gefährlichkeits- gruppe	Expositionsvorhersageband			
	EPL4	EPL3	EPL2	EPL1
A	2	1 (2) ²⁶	1	1
B	3	2	1	1
C	3	3	2	1
D	Speziell	Speziell	3	2
E	Speziell	Speziell	Speziell	Speziell

Die Beschreibung aller Regeln des EMKG kann hier nicht vollständig sein, sie finden sich in den im Literaturverzeichnis aufgeführten Quellen und können dort leicht nachgeschlagen werden.

B.5 Umsetzung der Maßnahmenpakete

Zur konkreten Umsetzung der oben in allgemeiner Form beschriebenen Maßnahmenpakete stellen die COSHH Essentials so genannte „Control Guidance Sheets“ zur Verfügung. Analog hierzu werden im Rahmen des EMKG Schutzleitfäden beschrieben. Diese Schutzleitfäden decken wichtige verfahrenstechnische Einheitsoperationen ab, wie z. B. Mischen, Sieben, Lagern, Beschichten, Befüllen/Entleeren von Behältern, Wiegen, Pelletieren, Trocknen, Probenahme, Reinigen etc. Die erforderliche technische Ausgestaltung wird durch schematische Zeichnungen illustriert. Um die Schutzleitfäden auch für KMU mit nur wenig Expertenwissen nutzbar zu machen, sind zu den Einheitsoperationen klare technische und organisatorische Vorgaben und Verhaltensweisen aufgeführt. Sie decken die Grundinformation über die technischen Maßnahmen und die gute Betriebspraxis ab. Dies wird unterstützt durch Informationen über PSA, Training, Wartung, Reinigung, Haushaltung und Prüfverfahren sowie durch Hinweise auf weitere Informationsquellen (z. B. technisches Regelwerk). Jedes „Control Guidance Sheet“ enthält dazu eine einfache Checkliste.

²⁶ Für hochflüchtige Stoffe, die in Litermengen gehandhabt werden, fordert das EMKG hier den Einsatz von technischen Maßnahmen.

Verzeichnis der Tabellen in den Anhängen

Tab. B.1.1	Zuordnung von R-Sätzen zu Gefährlichkeitsgruppen	71
Tab. B.1.2	Gefährlichkeitsgruppe vs. anzustrebende Luftkonzentrationsbereiche	71
Tab. B.2.1	Kategorien zum Staubungsverhalten	72
Tab. B.3.1	Definition der Mengengruppen	73
Tab. B.3.2	Definition der Expositionsvorhersagebänder für Feststoffe	74
Tab. B.3.3	Definition der Expositionsvorhersagebänder für Flüssigkeiten	74
Tab. B.3.1	Beschreibung der Maßnahmenpakete	75
Tab. B.3.2	Vorhergesagte Expositionsbereiche für Staub (mg/m ³)	75
Tab. B.3.3	Vorhergesagte Expositionsbereiche für Dampf (ppm)	75
Tab. B.4.1	Zuordnung von Gefährlichkeitsgruppe und Expositionspotenzial zu den erforderlichen Maßnahmenpaketen (COSHH Essentials, Feststoffe)	76
Tab. B.4.2	Zuordnung von Gefährlichkeitsgruppe und Expositionspotenzial zu den erforderlichen Maßnahmenpaketen (COSHH Essentials, Flüssigkeiten)	76
Tab. B.4.3	Zuordnung von Gefährlichkeitsgruppe und Expositionspotenzial zu den erforderlichen Maßnahmenpaketen (EMKG, Feststoffe)	77
Tab. B.4.4	Zuordnung von Gefährlichkeitsgruppe und Expositionspotenzial zu den erforderlichen Maßnahmenpaketen (EMKG, Flüssigkeiten)	78

Verzeichnis der Abbildungen in den Anhängen

Abb. A.1.1	Augenzahlsumme vs. Wahrscheinlichkeit	61
Abb. A.2.1	Einfluss von gepoolten Daten auf die Modellbildung	65
Abb. A.3.1	Einfluss von Korrelationen auf die Modellierung	67
Abb. B.2.1	Diagramm zur Bestimmung der Flüchtigkeit einer Flüssigkeit	73